

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu

Timo Kalinainen

Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut säteilyannokset ja niihin vaikuttavat tekijät

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelmassa.

Espoo, 29. 6. 2014

Työn valvoja: Professori Filip Tuomisto

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Jukka Sovijärvi

Aalto-yliopisto Perustieteiden korkeakoulu		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Timo Kalinainen		
Työn nimi: Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut säteilyannokset ja niihin vaikuttavat tekijät		
Title in English: Occupational Radiation Doses and Contributing Factors at Finnish Nuclear Power Plants		
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma		
Pääaine: Energiatieteet	Sivuaine: Systeemitieteet	
Opetusyksikön (ent. professuuri) koodi: F3002		
Työn valvoja: Prof. Filip Tuomisto		Työn ohjaaja(t): Jukka Sovijärvi, DI
<p>Tiivistelmä:</p> <p>Suomessa on tuotettu ydinenergiaa vuodesta 1977 alkaen. Työntekijöiden ja väestön säteilyaltistuksen minimointi on tärkeä osoitus vastuullisesta tavasta tuottaa ydinvoimaa. Suomalaisilla ydinvoimaloilla ei ole koskaan ylitetty viranomaisen asettamia henkilökohtaisia annosrajoja. Työntekijöiden kollektiiviannot ovat selvästi alittaneet viranomaisvaatimukset lähes aina ja ne ovat olleet soveltuvin osin kansainvälisesti vertailtuna pieniä. Kollektiiviset säteilyannokset saavuttivat huippunsa 1990-luvun alussa ja sen jälkeen ne ovat laskeneet lukuun ottamatta muutamia vuosia, jolloin laitoksilla tehtiin suuria huoltotöitä. Tieto ydinvoimaloilla aiheutuneista säteilyannoksista kerätään Suomessa Säteilyturvakeskuksen ylläpitämään sähköiseen annosrekisteriin.</p> <p>Säteilyaltistusta mitataan suomalaisilla ydinvoimaloilla kahdella eri tekniikalla: termoluminesenssidosimetreillä sekä elektronisilla dosimetreillä. Ensin mainittu on ensisijainen tietolähde viralliseen annosrekisteriin kirjattaville annoksille. Elektroniseen dosimetriin voidaan asettaa hälytysrajat ja niiden avulla voidaan kertynyt säteilyannos yhdistää tehtyyn työhön ja työtilaan. Ääreisannoksia mitataan sormidosimetreillä tarvittaessa. Kontaminaatiota ja kehon sisäistä säteilyä mitataan kokokehomonitoreilla, joiden kautta valvonta-alueelta poistutaan.</p> <p>Ydinvoimalaitostyöntekijöiden säteilyannoksen pääasialliset lähteet ovat primäärijäähdytteen mukana kulkeutuneet aktivoitumistuotteet, jotka ovat kiinnittyneet laitoksen järjestelmien pinnoille. Jäähdytteen aktivoitumistuotteet ovat pääosin lyhytikäisiä ja aiheuttavat säteilyvaaraa vain laitoksen käydessä. Aktivoituneet korroosiotuotteet ja epäpuhtaudet ovat merkittävin säteilylähde huoltotöiden aikana. Tärkeimpiä aktivoitumistuotteita ovat koboltti ja antimoni.</p> <p>Suurimmat kollektiiviannokset ovat kertyneet mekaanisia ja konekunnossapitotöitä tekeville molemmilla suomalaisilla ydinvoimaloilla. Seuraavaksi suurimpia kollektiiviannoksia saavat eristäjät, laitossiivoajat sekä materiaalitarkastajat. Yhdessä nämä neljä ammattiryhmää saavat noin kaksi kolmasosaa kaikesta säteilyaltistuksesta suomalaisilla ydinvoimaloilla. Suurimpia henkilöannoksia saavat eristäjät, siivoajat sekä säteilysuojelutyöntekijät. Viranomaisvaatimuksilla sekä uusilla käytönaikaisilla tarkastusohjelmilla näyttää olleen säteilyannoksia vähentävä vaikutus. Jatkossa lähdetermin vähentäminen vaikuttaa lupavimmalta tavalta edelleen vähentää säteilyaltistusta.</p>		
Päivämäärä: 29.6.2014	Kieli: suomi	Sivumäärä:58
Avainsanat: Työperäinen säteilyaltistus, ydinvoima, dosimetria, lähdetermi, annosrekisteri		

Aalto University School of Science		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Timo Kalinainen			
Title: Occupational Radiation Doses and Contributing Factors at Finnish Nuclear Power Plants			
Title in Finnish: Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut säteilyannokset ja niihin vaikuttavat tekijät			
Degree Programme: Degree Programme in Engineering Physics and Mathematics			
Major subject: Advanced Energy Systems		Minor subject: Systems Sciences	
Chair (code): F3002			
Supervisor: Professor Filip Tuomisto		Instructor: Jukka Sovijärvi, M.Sc. (Tech.)	
<p>Abstract:</p> <p>Finland has produced nuclear power since 1977. Low occupational radiation exposure of plant work force is a sign of a responsible nuclear energy industry. Personal dose limits have never been exceeded at Finnish nuclear power plants. Collective doses have nearly always remained below national exposure limits and are favourably comparable with similar foreign plants. Collective doses peaked during the early nineties and have since decreased except for a few years, when extensive maintenance work was undertaken. All occupational radiation doses are recorded in a national dose registry maintained by the Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority.</p> <p>Occupational exposure is monitored at Finnish nuclear power plants using two technologies: thermoluminescence dosimetry and electronic dosimeters. Thermoluminescence dosimeters are the primary information source for the official dose registry. Electronic dosimeters allow documenting exposure from specific maintenance tasks and locations. When necessary, finger and eye dosimeters are used. Contamination and internal radiation exposure are monitored with full-body scanners at the exit points from the controlled area.</p> <p>The principal radiation hazard in nuclear power plants comes from activation products carried by the primary coolant and deposited on the surfaces of various subsystems. The activation products of the coolant itself are short lived and pose a danger only when the reactor is running. Activated corrosion products and impurities are the most hazardous radiation source during outages. Cobalt and antimony are the principal activation products at Finnish nuclear power plants.</p> <p>Mechanical maintenance workers have accrued the largest collective doses at both Loviisa and Olkiluoto. Insulation installers, cleaners and materiel inspectors receive the next largest doses. Together these four professions account for roughly two thirds of the collective doses accrued. Insulation installers, cleaners and radiation protection workers receive the largest personal doses. Governmental regulations and new in-service inspection programmes appear to have had a positive effect on radiation exposure. The most promising method for minimizing occupation radiation exposure in the future appears to be reducing the source term by eliminating activation prone elements from the primary coolant system.</p>			
Date: 29. 6. 2014	Language: Finnish		Number of pages: 58
Keywords: Occupational radiation exposure, nuclear power in Finland, dosimetry, source term, dose registry			

Esipuhe

Tämä diplomityö käsittelee suomalaisilla ydinvoimaloilla saatuja säteilyannoksia. Työ tehtiin Säteilyturvakeskuksen ydinvoimalaitosten valvontaosaston säteilysuojelutoimiston tuella ja rahoituksella. Diplomityön ohjaaja ja pääasiallinen tuki oli säteilysuojelutoimiston ylitarkastaja ja myöhemmin toimistopäällikkö Jukka Sovijärvi. Hänen lisäksi koko säteilysuojelutoimiston väki – Lauri Pöllänen, Tommi Renvall, Veli Riihiluoma, Nina Svahn ja Antti Tynkkynen – auttoivat työhön liittyvissä ja liittymättömissä ongelmissa, mistä heille suurkiitos. Heidän lisäksi haluan kiittää koko ydinvoimalaitosten valvontaosaston väkeä sekä säteilyturvakeskuksen muuta henkilöstöä. Ystävällisessä ja avuliaassa ympäristössä oli ilo työskennellä.

Työn valmistumista auttoi suuresti Säteilyturvakeskuksen annosrekisterin ylläpidon apu ja yhteistyö. Myös ydinvoimayhtiöiden säteilysuojeluorganisaatiot antoivat omia tietoaaineistojaan käyttööni. Haluankin kiittää Timo Koivistoa Fortumilta ja Jukka Henttistä ja Jaska Mansikkaa TVO:lta avusta ja hyödyllisistä keskusteluista.

Haluan lisäksi kiittää Teknillisen fysiikan laboratoriosta Pertti Aarniota, Rainer Salomaata ja Filip Tuomistoa ohjauksesta ja kommenteista sekä vanhempiani, pikkuveljeäni ja ystäviäni tuesta ja rohkaisusta.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Säteilyannoksen mittaaminen	3
2.1	Ulkoisen annos	4
2.1.1	Termoluminesenssidosimetrit	4
2.1.2	Elektroniset dosimetrit	5
2.2	Sisäinen annos	6
2.3	Ääreisannokset	7
2.4	Annoksen arviointi silloin, kun annosmittaus ei ole onnistunut	7
2.4.1	Laitoksen kiinteät annosnopeusmittalaitteet	7
3	Työntekijöiden säteilyannoksen lähdetermin	9
3.1	Jäähdytteen aktivoitumistuotteet	9
3.2	Jäähdytteen mukana kulkeutuvat korroosiotuotteet ja epäpuhtaudet	11
3.3	Muut lähdetermin	13
4	Laitoksilla tehdyt muutostyöt ja lähdetermin pienentäminen	16
4.1	Loviisan laitostyöyksiköiden eroavaisuudet	16
4.2	Loviisa 1:n höyrystimien YB13 ja YB15 dekontaminointi vuonna 1980	17
4.3	Loviisa 2:n primääripiirin dekontaminointi vuonna 1994	17
4.4	Olkiluodon laitostyöyksiköiden tehonkorotukset	18
5	Työntekijöiden saamat säteilyannokset	20
5.1	Kollektiiviset säteilyannokset	22
5.1.1	Eniten altistuneen työntekijän annos	25
5.1.2	Kahdenkymmenen eniten altistuneen työntekijän annos	26
5.1.3	Neutroniannokset	27
5.2	Työntekijäryhmäkohtaiset annokset	29
5.2.1	Eristetyt	31
5.2.2	Siivous	32
5.2.3	Säteilysuojelu	32
5.2.4	Jätteiden käsittely ja dekontaminaatio	32
5.2.5	Mekaaninen kunnossapito	35
5.2.6	Materiaalitarkastukset	35
5.2.7	Kiinteistötyöt	37
5.2.8	Telinetyöt ja haalaus	37
5.2.9	Sähkö- ja automaatiotyöt	40
5.2.10	Instrumentointityö	40

5.2.11	Polttoainetyöt	41
5.2.12	Laboratoriotyöt	41
5.2.13	Käyttöhenkilöstö	43
5.2.14	Muut työt	44
5.3	Työkohdekohtaiset annokset	44
5.3.1	Höyrystintila	44
5.3.2	Reaktori	45
6	Toimintatapojen vaikutus säteilyannoksiin	47
6.1	Vuosihuoltojen suunnittelu	47
6.2	Säteilysuojelu osana työsuojelua	49
6.3	Viranomaisvalvonta	51
6.4	Riskitietoiset tarkastusohjelmat	51
7	Yhteenveto ja päätelmät	53
8	Lähdeluettelo	55

1 Johdanto

Suomessa on tuotettu ydinenergiaa vuodesta 1977 lähtien. Kuten muillakin teollisuuden aloilla, myös ydinenergian tuotannossa on työntekijöiden terveyden ja turvallisuuden vaaliminen tärkeä osoitus vastuullisesta tavasta toimia. Ydinvoimaloissa osa työturvallisuutta on hyvä säteilysuojelu, jonka päämääränä on estää ionisoivan säteilyn aiheuttamat deterministiset vaikutukset eli säteily sairaudet ja minimoida säteilyn aiheuttamat stokastiset vaikutukset eli syöpäriskin kasvu ja perinnölliset vaikutukset. Säteilysuojelutyö pohjaa International Commission on Radiological Protection (ICRP):n muotoilemiin kolmeen periaatteeseen: oikeutus-, yksilönsuoja- ja optimointiperiaatteisiin.

Oikeutusperiaatteen mukaan säteilyn käytöstä saatavan hyödyn on aina oltava siitä aiheutuvaa haittaa suurempi. Tämän vaatimuksen täyttämiseksi katsotaan, että ydinvoimalla tuotetusta sähköenergiasta saatava hyöty on yhteiskunnan kokonaisedun kannalta suurempi kuin ydinvoiman ympäristöhaitat ja sen aiheuttaman kollektiivisen säteilyannoksen aiheuttama terveyshaitta. Kaikkiin energiantuotantomuotoihin liittyy terveys- ja ympäristöhaittoja. Ympäristöhaitat aiheutuvat ensisijaisesti polttoaineiden hankinnasta, vesivoimaloiden patoaltaista ja tuulivoiman paikallisista haitoista. Fossiilisten ja biopolttoaineiden ympäristöhaittoja ovat lisäksi polttamisessa syntyneet päästöt. Terveysvaikutuksia aiheuttavat pienhiukkaspäästöt, muut ilmansaasteet sekä työntekijöiden ammattitauti- ja onnettomuusriskit.

Yksilönsuoja- ja optimointiperiaatteiden toteutuminen riippuu onnistuneesta säteilysuojeluohjelmasta ydinvoimaloilla. Periaatteiden mukaan yhdenkään henkilön terveys ei saa vaarantua ja toiminnasta aiheutuva kollektiivinen säteilyaltistus on pidettävä niin pienenä kuin on käytännöllisin toimin mahdollista. Näiden periaatteiden mukaisen säteilyvalvonnan toteutumista valvoo Suomessa Säteilyturvakeskus, joka kerää tietoa Suomessa tapahtuvasta työperäisestä säteilyaltistuksesta sekä tarkastaa ja valvoo luvanhaltijoiden työskentelyä. Suomalaisilla ydinvoimaloilla ei ole kertaakaan ylitetty henkilökohtaisia vuosiannosrajoja. Kollektiiviselle annokselle asetettu raja on ylitetty kerran, minkä seurauksena tehdyn selvityksen ja toimenpidesuunnitelman perusteella on saatu aikaan tuntuva vähennys kollektiiviannoksessa.

Tämä diplomityö tarkastelee suomalaisilla ydinvoimaloilla kertyneitä säteilyannoksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä, kuten lähdetermin suuruutta ja toimintatapojen vaikutusta. Annoksia tarkastellaan laitoksittain, ammattiryhmittäin ja työkohteittain. Pääasiallisina tietolähteinä on käytetty Säteilyturvakeskuksen ylläpitämää kansallista annosrekisteriä, johon on tallennettu kaikki Suomessa saadut työperäiset säteilyannokset, sekä ydinvoimayhtiöiltä Fortumilta ja Teollisuuden Voimalta saatuja sähköisten annosvalvontajärjestelmien tietoja. Näiden lisäksi työtä varten on haastateltu ydinvoimayhtiöiden säteilysojeluhenkilöstöä sekä viranomaisvalvonnasta vastaavia henkilöitä. Työ on toteutettu Säteilyturvakeskuksen rahoituksella ja tuella.

Työssä käydään lyhyesti läpi säteilyn mittaamiseen käytetyt menetelmät ja käytännöt ydinvoimaloilla. Henkilöannosvalvonnassa on käytössä kaksi eri teknologiaa, termoluminesenssidosimetrit sekä elektroninen dosimetrijärjestelmä. Virallinen annosseuranta toteutetaan termoluminesenssidosimetreillä. Elektronisen dosimetrijärjestelmän hyötyjä on annoksen yhdistäminen työkohteeseen ja -tehtävään työkoodeja käyttämällä sekä mahdollisuus hälytyksen antamiseen säteilyannoksen tai annosnopeuden noustessa liian suureksi. Sisäisen säteilyn ja ääreisannosten mittaamista käsitellään lyhyesti.

Säteilyannoksen mittaamisen jälkeen työssä tarkastellaan säteilyn lähdeterminiä eli prosessia, joka altistaa työntekijät ionisoivalle säteilylle. Lähdeterminin kehittymiseen ja sen vähentämiseen tähtääviin toimiin kuuluu osana ydinvoimalaitoksilla tehty muutostyöt.

Merkittävimpien säteilyaltistusta aiheuttavien aineiden kuten koboltin, hopean ja anti-monin määrää primäärijäähdytteen kanssa kosketuksiin tulevissa järjestelmissä on pyritty vähentämään osana voimalaitosten ylläpito- ja modernisointiprosessia. Erityisesti Loviisan voimalaitoksella uusittavista pääkiertopumppujen tiivisteistä uskotaan saata-
van merkittäviä annossäästöjä tulevaisuudessa.

Työn keskeisin osuus käsittelee ydinvoimalaitoksilla saatuja säteilyannoksia sekä laitose-
ttä ammattiryhmäkohtaisesti. Kollektiiviannosta ja eniten altistuneiden henkilöiden sä-
teilyannoksia tarkastellaan koko käyttöhistorian ajalta. Ammattiryhmittäin säteilyan-
noksia tarkastellaan alkaen vuodesta 1990, sillä tätä edeltävien vuosien tiedot säteilyä
saaneiden henkilöiden työtehtävistä ovat puutteellisia. Ammattiryhmien osalta tarkas-
tellaan sekä kollektiivista annosta että ammattiryhmän keskimäärin saamaa säteilyan-
nosta. Jälkimmäinen kertoo kollektiiviannosta enemmän kyseisen ammattiryhmän työs-
kentelyoloista, sillä ammattiryhmän koolla on huomattava vaikutus kollektiiviannok-
seen.

Suurimmat kollektiiviannokset ovat molemmilla laitospaikoilla kertyneet mekaanisia- ja
konekunnossapitotöitä tekeville. Muista ammattiryhmistä eristäjät, siivoajat sekä mate-
riaalitarkastajat saavat merkittävän osan kollektiivisesta säteilyannoksesta. Yhdessä
näiden neljän ammattiryhmän osuus kaikesta säteilyaltistuksesta vaihtelee kuuden-
kymmenen ja kahdeksankymmenen prosentin välillä. Kollektiiviannokset suomalaisilla
ydinvoimaloilla kasvoivat 1990-luvun alkuun asti. Tämän jälkeen annokset ovat laske-
neet lukuun ottamatta sellaisia yksittäisiä vuosia, jolloin laitoksilla tehtiin tavallista suu-
rempia huolto- ja muutostöitä. Viime vuosina molemmilla voimalaitoksilla on kirjattu
ennätyksellisen alhaisia säteilyannoksia.

Suurimmat henkilökohtaiset säteilyannokset ovat kertyneet eristetöistä, siivouksesta ja
säteilysuojelutyöstä. Lämpöeristeiden purkaminen ja myöhemmin kokoaminen putkis-
tojen ympärille vaatii eristäjiltä työskentelyä säteilevien putkistojen välittömässä lähei-
syydessä. Samoin laitossiivoajat ja säteilyvalvojat ja säteilysuojien kokoajat joutuvat
työskentelemään säteilevissä tiloissa. Myös jätteiden käsittelyyn ja dekontaminointityö-
hön osallistuvien henkilökohtaiset annokset ovat suurehkoja. Materiaalitarkastajien ja
konekunnossapitotöiden ammattiryhmissä on runsaasti vain vähän säteilylle altistuvia
työntekijöitä, minkä takia heidän keskimääräiset säteilyannoksensa ovat työntekijöiden
keskitasoa suurista kollektiiviannoksista huolimatta.

Lopuksi tässä työssä tarkastellaan inhimillisten tekijöiden vaikutusta säteilyannoksiin.
Vuosihuoltojen suunnittelulla ja erityisesti töiden ajoituksella on merkittävä vaikutus sä-
teilyaltistukseen. Putkistojen pitäminen vedellä täytettynä aina kun mahdollista on pie-
nentänyt työtiloissa vallitsevaa annosnopeutta tuntuvasti. Vuosihuoltojen järjestyksellä
ja töistä oppimisella arvioidaan olevan vaikutusta töiden sujuvuuteen ja niistä kertynee-
seen annokseen. Vaikka ydinvoimayhtiöillä on omat jatkuvaan parantamiseen tähtäävät
toimenpideohjelmansa, myös viranomaisvalvonnalla on ilmeisesti ollut vaikutusta sätei-
lyannosten pienenemiseen. Voimalaitosten määräaikaistarkastusohjelmaan on tullut
muutoksia, joilla pyritään kohdistamaan tarkastukset laitosten kokonaisriskin kannalta
tärkeimpiin kohteisiin. Näiden muutosten seurauksena myös tarkastajien työstään saa-
mat säteilyannokset ovat alustavien tietojen mukaan pienentyneet. Jatkossa lähdettermin
pienentäminen lienee tehokkain tapa edelleen vähentää säteilyaltistusta.

2 Säteilyannoksen mittaaminen

Ydinvoimaloiden ominaispiirre työsuojelun kannalta on säteilyn aiheuttama vaara. Ydinvoimalaitoksen työntekijöiden säteilyannoksen mittaamisesta on säädetty laissa [1], [2] ja Säteilyturvakeskus on antanut asiasta viranomaisohjeen [3], [4]. Työntekijöiden saamat säteilyannokset on mitattava korkeintaan kuukauden mittaisissa jaksoissa ja annostiedot on ilmoitettava Säteilyturvakeskuksen ylläpitämään kansalliseen annosrekisteriin. Tällä tavoin valvotaan, ettei kenenkään säteilytyöntekijän työssään saama säteilyannos ylitä lain asettamia rajoja.

Henkilöt, jotka saavat tai saattavat saada työssään yli 1 millisievertin vuotuisen säteilyannoksen, luokitellaan Suomessa säteilytyöntekijöiksi. Säteilytyöntekijöiden luokittelusta määrätään säteilyasetuksen 10 §:ssä seuraavasti [2]:

Säteilytyötä tekevät työntekijät luokitellaan seuraavasti:

1) säteilytyöluokkaan A kuuluvat ne työntekijät, joille työstä aiheutuva efektiivinen annos, kun otetaan huomioon työhön liittyvä poikkeavaan säteilyaltistukseen johtavan tapahtuman mahdollisuus, on tai voi olla suurempi kuin 6 mSv vuodessa tai ekvivalenttiannos suurempi kuin kolme kymmenesosaa silmän mykiölle, iholle, käsille ja jaloille säädetyistä annosrajoista; ja

2) säteilytyöluokkaan B kuuluvat ne työntekijät, jotka eivät kuulu säteilytyöluokkaan A.

A-luokan säteilytyöntekijöiden suuri sallittu vuotuinen säteilyannos on 50 mSv kuitenkin niin, että viiden vuoden aikana saatu säteilyannos on korkeintaan 100 mSv. Kokokehoannoksen lisäksi myös silmän mykiön ja ihon ekvivalenttiannoksille on määriteltä ylärajat sekä säteilytyöntekijöiden että muuhun väestöön kuuluvien kohdalla. Rajat on esitetty taulukossa (Taulukko 1).

Taulukko 1: Säteilyannosten vuotuiset ylärajat säteilytyöntekijöille ja väestöllä

	A-luokka	B-luokka	väestö
Koko kehon efektiivinen annos			
vuodessa	50 mSv	6 mSv	1 mSv
5 vuodessa	100 mSv		
Käsien, jalkojen tai ihon ekvivalenttiannos	500 mSv	150 mSv	50 mSv
Silmän mykiön ekvivalenttiannos	150 mSv	45 mSv	15 mSv

Säteilytyöntekijöiden annosrajat tulevat muuttumaan kun Suomi muokkaa oman lain-säädäntönsä Euroopan komission direktiivin 2013/59/Euratom [5] mukaiseksi helmikuuhun 2018 mennessä. Koko kehon efektiivisen säteilyannoksen vuotuiseksi ylärajaksi tulee 20 mSv ilman viiden vuoden keskiarvoistusta. Silmän mykiön ekvivalenttiannoksen ylärajaksi tulee myös 20 mSv [5]. Suurehko muutos nykyiseen annosrajaan johtuu silmän mykiön erityisestä herkkyydestä ulkoiselle säteilylle, deterministisiä terveysvaikutuksia, erityisesti harmaakaihia, voi esiintyä jo 200 mSv ekvivalenttiannoksen jälkeen. Halutessaan EU:n jäsenmaat voivat asettaa Euratomin suosituksia tiukempiakin säteilyannosrajoja.

Ydinvoimalaitosten ne tilat, joissa on säteilyvaaran mahdollisuus, on jaettu tarkkailu- ja valvonta-alueisiin. Tarkkailualueiksi määritellään tilat, joissa vuotuinen säteilyannos voi ylittää 1 mSv kun tavanomaisten säteilyolosuhteiden lisäksi otetaan huomioon myös ennakoitavissa olevat tapahtumat [3], [4]. Tarkkailualueen työskentelyolosuhteita on valvottava ja säteilylähteet on merkittävä asianmukaisesti. Valvonta-alueeksi määritellään ne tilat, joissa suoran säteilyn annosnopeus saattaa ylittää 3 $\mu\text{Sv/h}$ tai 40 tunnin viikoittaisesta oleskelusta voi aiheutua 1 mSv sisäinen säteilyannos. Valvonta-alueen huonetilat luokitellaan suomalaisilla ydinvoimaloilla suoran säteilyannosnopeuden mukaan kolmeen vyöhykkeeseen. Jokaiseen oveen merkitään siitä avautuvan huonetilan luokitus. Suoran säteilyn annosnopeuden lisäksi huonetilat luokitellaan pinta- ja ilmakontaminaation perusteella. Olkiluodon laitoksella kontaminaatiotasot ilmoitetaan jokaiselle huonetilalle, Loviisan laitoksella merkitään vain alhaisimmasta eli vihreästä vyöhyke- luokituksesta poikkeavat kontaminaatiotasot.

Valvonta-alueella liikuttaessa on jokaisella oltava mukanaan henkilökohtainen termoluminesenssidosimetri. Ydinvoimayhtiöt käyttävät virallisen tl-dosimetrin lisäksi elektronista annosvalvontajärjestelmää, ja jokaisen valvonta-alueella liikkuvan on käytettävä myös tähän järjestelmään kuuluvaa sähköistä dosimetriä. Poikkeuksena ovat vierailijaryhmät, joiden kohdalla voidaan käyttää ryhmäkohtaisia dosimetrejä jos vierailusta odotettavissa oleva annos on pieni, muutamien mikrosievertien suuruusluokkaa.

2.1 Ulkoinen annos

2.1.1 Termoluminesenssidosimetrit

Suomen ydinvoimaloiden henkilöstön kuukausittaisen säteilyannoksen valvonta on toteutettu termoluminesenssidosimetreillä, joiden toiminta perustuu termoluminesenssimateriaalin kiderakenteeseen. Kidemateriaaliin lisätyt epäpuhtaudet saavat aikaan sen, että kiteeseen muodostuu valenssi- ja johtavuusvöiden väliin erillisiä energiatasoja. Jonkin verran johtavuusvyön alapuolella on energiataso, jonne elektronit voivat jäädä loukkuun. Vastaavasti valenssivyön yläpuolella on taso, jonne elektroniaukot voivat loukkuuntua [6].

Ionisoivan säteilyn osuessa kiteeseen se voi irrottaa kiteen valenssivyöltä elektronin, joka nousee johtavuusvyölle ja jää tietyllä todennäköisyydellä loukkuun johtavuusvyön alapuoliselle energiatasolle sen sijaan, että se rekombinoituisi heti aukon kanssa. Elektronia vastaava aukko voi samalla tavalla kulkeutua valenssivyön yläpuolella olevalle energiatasolle. Jos elektroneja ja aukkoja kaappaavat energiatasot ovat riittävän kaukana johtavuus- ja valenssivöistä, elektroni-aukko-parien rekombinaatio on huoneenlämmössä hidasta. Kun kidettä lämmitetään, elektroni ja aukko vapautuvat loukuistaan ja rekombinoituvat. Tällöin elektroni-aukko-parin muodostamiseen kulunut energia vapautuu valona, joka voidaan mitata valomonistinputkella. Vapautuvat valon määrästä voidaan laskea dosimetrin saama säteilyannos kun tunnetaan säteilyspektri- ja kidekohtaiset kalibrointikertoimet.

Termoluminesenssidosimetrin toimintaan vaikuttaa dosimetrin säilytysaika ja -lämpötila. Dosimetriin tallentunut säteilyjälki häviää ajan myötä itsestään loukkuuntuneiden elektronien vapautuessa. Tätä ilmiötä kutsutaan häipymiseksi ja sen voimakkuus mittaustajaksi on tunnettava, jotta annos voidaan määrittää oikein. Annoksen määrittämiseksi on myös huomioitava taustasäteily, jonka vaikutus halutaan poistaa mittaustuloksista. Tämän takia dosimetrejä säilytetään vain tietyissä dosimetritauluissa silloin kun ne eivät ole käytössä. Dosimetritaulujen kohdalla vallitseva taustasäteilyn annosno-

peus mitataan ja termoluminesenssikiteen rekisteröimästä kuukausiannoksesta vähennetään kiteen dosimetritaulussa saama taustasäteilyannos.

Sekä Olkiluodon että Loviisan laitoksella on käytössä Rados Technology Oy:n (aiemmin Alnor) valmistamat nelikiteiset termoluminesenssidosimetrit [7], [8], [9]. Olkiluodon voimalaitoksella on Radosin valmistamien dosimetreiden lisäksi käytössä Harshaw-mallin dosimetrejä etenkin vuosihuoltojen aikana. Radosin mittarissa on muovisen beetasäteilysuojan takana litiumboraatti- ja litiumfluoridikiteitä sekä yksi litiumboraattikide ilman beetasuojaa [8]. Lisäksi beetasuojan takana on yksi litiumboraattikide, jota ei tavallisesti käytetä vaan se pidetään varalla. Loviisan ja Olkiluodon laitoksilla käytettävät dosimetrikortit eroavat käytettyjen termoluminesenssimateriaalien osalta. Loviisan laitoksen dosimetrejä käytetään myös neutroniannokset mittaamiseen. Neutroniannos mitataan kiteiden 2 ja 3 tallentamien säteilyannosten erosta, sillä paikalla 2 oleva litiumfluoridikide on rikastettu litium-7:n suhteen, joten se rekisteröi vain gammasäteilyä [10]. Neutroniannoksia on mitattu vain Loviisan voimalaitoksella, sillä Olkiluodon voimalaitoksella on todettu, että neutroniannokset jäävät niin pieniksi ettei niiden erilliseen mittaamiseen ole tarvetta.

Taulukko 2: Termoluminesenssidosimetreiden kidejärjestys

kide	Loviisa		Olkiluoto		Harshaw	
1	LiB	syväannos, varalla	LiB	syväannos, varalla		
2	⁷ LiF	syväannos	⁷ LiF	syväannos	LiF	syväannos
3	LiB	syväannos + neutr.	⁷ LiF	syväannos	LiF	pinta-annos
4	LiB	pinta-annos	LiB	pinta-annos	LiF	(silmäannos)

2.1.2 Elektroniset dosimetrit

Uusimmat elektroniset henkilödosimetrit perustuvat puolijohdedetektoriin. Dosimetrisa on piistä tai muusta puolijohdemateriaalista valmistettu diodi, johon on kytketty estosuuntainen jännite. Jännite muodostaa kiteen keskelle tyhjennysalueen, jossa ei ole varauksenkuljettajia. Fotonin tai varautuneen hiukkasen osuessa tyhjennysalueen materiaaliin se ionisoi puolijohdemateriaalia. Syntyneet varauksenkuljettajat, aukot ja vapaat elektronit, vaeltavat sähkökentän vaikutuksesta erilleen. Syntynyt virtapulssi on verrannollinen säteilyn diodiin jättämään energiamäärään ja siten säteilyannokseen.

Suomen ydinvoimaloilla on käytössä henkilökohtaisten tl-dosimetreiden lisäksi yhteiskäytössä olevia elektronisia dosimetrejä. Suomen voimalaitoksilla käytetään MGPI:n DMC2000S -dosimetrejä [11], [12]. Näiden lisäksi Olkiluodossa on käytössä Radoksen RAD-51 -dosimetrejä sekä Geiger-Müller -putkeen perustuvia RAD-80 -mittareita [12]. Siirryttäessä valvonta-alueelle kukin henkilö kuittaa kulkuluvallaan sähköisen dosimetrim itselleen ja syöttää valvontaohjelmistoon työkoodin. Näin mittari ja sen mittaama annos voidaan yhdistää paitsi työntekijään myös työntekijäryhmään, paikkaan ja tehtyyn työhön. Olkiluodossa käytettävään järjestelmään voidaan työkoodin lisäksi ilmoittaa myös työmääräimen numero, jolloin järjestelmä tallentaa tiedon myös työkohteesta parhaimmillaan komponentin tarkkuudella.

Valvonta-alueella on lisäksi lukijalaitteita, joilla työkoodia voidaan muuttaa poistumatta valvonta-alueelta. Valvonta-alueelta tarkkailualueelle poistuttaessa elektroninen dosimetri luetaan ja palautetaan sille varattuun telineeseen. Järjestelmä kirjaa sähköisen dosimetrin rekisteröimän säteilyannoksen tietokantaan. Lisäksi mitataan työntekijän mahdollinen kontaminaatio kokokehomittauksella.

Elektronisten dosimetrien suurin etu yksinkertaiseen tl-dosimetriin verrattuna on reaaliaikainen annos- ja annosnopeusmittaus. Termoluminesenssidosimetrien annoskertymä voidaan lukea vasta jälkikäteen, kun sähköisestä dosimetristä annoskertymää voidaan myös tarkkailla annosmittarin näytöltä. Elektronisiin dosimetreihin voidaan ohjelmoida hälytysrajat sekä annokselle että annosnopeudelle suunnitellun työtehtävän ja työtilan säteilytilanteen mukaan. Esimerkiksi vierailijoiden käyttämiin elektronisiin dosimetreihin ohjelmoidaan matalammat hälytyskynnykset kuin työtehtävissä liikkuvien käyttämiin dosimetreihin.

2.2 Sisäinen annos

Sisäisellä annoksella tarkoitetaan kehossa olevien radioaktiivisten aineiden aiheuttamaa säteilyannosta. Voimalaitosympäristössä voi aiheutua sisäistä annosta esimerkiksi huoltotöiden yhteydessä hengitettäessä kontaminoitunutta ilmaa ilman asianmukaisia suojavarusteita. Jos säteilevää ainetta päätyy kehoon, siitä on vaikeaa tai mahdotonta päästä eroon. Jotkin aineet kuten tritium eivät rikastu ihmiskehoon ja poistuvat päivien tai viikkojen kuluessa kehosta. Esimerkiksi kesium taas käyttäytyy kemiallisesti kuten kalium ja kerääntyy ihmiskehossa lihaksiin ja poistuu kehosta huomattavasti hitaammin [13], [14]. Tämä tekee sisäisestä annoksesta potentiaalisesti merkittävän säteilysuojeluriskin. Jos ulkoinen annos lähestyy sallittua annosrajaa, altistus voidaan lopettaa yksinkertaisesti siirtymällä säteilevien tilojen ulkopuolelle. Sisäisen annoksen pienentämiseksi ei ole yhtä helppoa keinoa. Tämän lisäksi sisäisen annoksen reaaliaikainen mittaaminen ei ole mahdollista, joten sisäiseltä altistukselta suojautuminen on tärkeää vaikka sisäiset annokset ovatkin aiheuttaneet vain reilusti alle promillen kaikista suomalaisilla voimalaitoksilla rekisteröidyistä annoksista [15].

Sisäisen annoksen mittaamiseen liittyy useita hankaluuksia. Sisäisen annoksen kannalta hankalimpia ovat alfa- ja beetasäteilijät, kun ulkoinen annos aiheutuu lähes pelkästään gammasäteilystä. Kehon sisäisen alfasäteilyn mittaaminen kehon ulkopuolelta ei ole mahdollista, sillä alfasäteilyn tunkeutumisvyvyys kiinteisiin aineisiin on vain muutamien mikrometrien luokkaa. Kehon sisäistä gamma-aktiivisuutta voidaan mitata kehon ulkopuolelta tätä tarkoitusta varten erikseen valmistetuilla mittalaitteilla. Valvonta-alueelta poistuttaessa työntekijät kulkevat henkilömonitorien kautta, jotka mittaavat työntekijöiden iholla ja varusteissa olevan kontaminaation lisäksi rintakehän alueella olevan kehon sisäisen gamma-aktiivisuuden [11], [16]. Loviisan ja Olkiluodon voimalaitoksilla käytetään henkilökontaminaatiomonitorina Radoksen RTM860 TS -mallia [11]. Mikäli tässä seulontamittauksessa havaitaan kehon sisäistä aktiivisuutta, suoritetaan tarkentava gammaspektroskooppinen mittaus Säteilyturvakeskuksen laitteilla. Tarvittaessa voidaan suorittaa kehon sisäisen alfa- ja beeta-aktiivisuuden nestetuikemittaus Säteilyturvakeskuksen laboratoriossa.

Ilmakontaminaation aiheuttamaa sisäistä annosta estetään asianmukaisilla hengityssuojaimilla. Sopivan hengityssuojaimen valinta riippuu työskentelyoloista ja kontaminaation sisältämistä kemiallisista yhdisteistä. Pintakontaminaatiolta suojaudutaan suojavaatteilla ja niiden oikealla riisumisjärjestyksellä. Valvonta-alueella käytetään aina kengänsuojia tai laitoskenkiä sekä suojahaalaria tai -takkia, myös kontaminoitumattomissa tiloissa. Vakavasti kontaminoituneissa tiloissa työntekijät käyttävät raitisilmasuodattimilla tai paineilman syötöllä varustettuja kaasutiiviitä suojapukuja.

Vuosihuoltojen yhteydessä suomalaisilla ydinvoimaloilla mitataan vuosihuoltoon osallistuvia työntekijöitä Säteilyturvakeskuksen siirrettävällä gammaspektroskooppisella mitauslaitteistolla kehon sisäisen kontaminaation määrittämiseksi. Mittaukseen valitaan

työntekijöitä siten, että saadaan edustava otos eri ammattiryhmistä ja eri huoltotöihin osallistuneista työntekijöistä. Samanlaisiin mittauksiin kutsutaan myös voimaloiden lähiseutujen asukkaita osana voimaloiden radioaktiivisten päästöjen tarkkailua.

2.3 Ääreisannokset

Joissakin tilanteissa työntekijän jotkin ruumiinosat altistuvat merkittävästi erilaisella säteilykeilalle kuin hänen rintataskussaan oleva annosmittari. Näin voi käydä esimerkiksi pistemäisiä lähteitä käsitellessä, jolloin työntekijän käsien kokemat annosnopeudet ovat huomattavasti suuremmat kuin noin puolen metrin päässä olevan annosmittarin. Tällöin on aiheellista käyttää sormidosimetriä mittaamaan käsien saamaa annosta. Sormidosimetri on muovinen sormus, jossa on yksi termoluminesenssidosimetrin mittakide.

Sormiannoksia on raportoitu yhteensä 129 kappaletta vuosina 1999 – 2013. Annoksista 102 kappaletta ylitti kirjauskynnyksen. Suurin vuotuinen sormiannos on 159,2 mSv vuodelta 1999. Kirjauskynnyksen ylittäneiden vuosiannosten keskiarvo on 32,3 mSv [15].

Silmäannosten mittaamiseen voidaan käyttää siihen erityisesti suunniteltuja dosimetrejä tai esimerkiksi silmä- tai suojalasien sankaan ripustettua sormidosimetriä. Silmäannoksia ei ole mitattu suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla. Euroopan komission direktiivin 2013/59/Euratom käyttöönoton jälkeen silmäannosten mittaamisen tarpeellisuus tullaan arvioimaan uudelleen.

2.4 Annoksen arviointi silloin, kun annosmittaus ei ole onnistunut

Työntekijöiden virallinen annosseuranta toteutetaan termoluminesenssidosimetreillä. Jos työntekijän käytössä oleva termoluminesenssidosimetri hajoaa, kastuu tai häviää, on annos arvioitava muista lähteistä. Ensijainen tietolähde on tällöin työntekijän käyttämä elektroninen dosimetri. Jos annosta ei voida kirjata elektronisen dosimetrin avulla, se määritetään työparin saaman annoksen tai työskentelytilan annosnopeuden ja työhön kuluneen ajan perusteella.

Annosarvioita on kirjattu annosrekisteriin yhteensä 1619 kappaletta eli noin 0,3 % kaikista kuukausiannoksista. Näistä 846 kappaleessa arvioitu annos on ylittänyt kirjauskynnyksen. Suurin arvioitu annos on 8,85 mSv vuodelta 2005. Yli yhden millisievertin suuruisia annosarvioita on kirjattu 204 kappaletta [15].

2.4.1 Laitoksen kiinteät annosnopeusmittalaitteet

Ydinvoimalaitoksilla on henkilökohtaisten dosimetrrien lisäksi kiinteitä ja liikuteltavia säteilymittareita. Näitä käytetään voimalaitoksen tilojen säteilytasojen monitorointiin. Säteilytasojen muutos kertoo laitoksen toiminnassa tapahtuneesta muutoksesta. Annosnopeutta mitataan tiloissa, joissa annosnopeus voi muuttua nopeasti.

Pinta- ja ilmakontaminaation mittaamiseen on erikseen suunnitellut laitteet. Ilmakontaminaation mittaamiseen käytetään mittareita, jotka puhaltavat huoneilmaa aktiivihiihiä ja mikrokuitusuodattimen läpi. Pienhiukkasina tai jodin yhdisteinä ilmassa esiintyvä kontaminaatio jää kiinni suodattimiin, joiden aktiivisuus mitataan. Jalokaasujen mittausta varten huonetilan ilmanäyte ohjataan suljettuun säiliöön, jonka yhteydessä on säteilymittari. Pintakontaminaatiota valvotaan pyyhkäisyäytteillä, käsikäyttöisillä pinta-

monitoreilla ja lattian monitorointiin tarkoitetuilla työnnettävillä mittalaitteilla [11], [16].

Kontaminaatiomittareita käytetään laitoksen tilan monitoroinnin lisäksi kontaminaation siivouksen seurantaan. Myös kaikki valvonta-alueelta ulos tuotava materiaali kuten muistiinpanovälineet tai työkalut mitataan kontaminaatiomittareilla. Vain riittävän puhtaaksi todettu materiaali voidaan tuoda ulos valvonta-alueelta, kontaminoitunut materiaali joko puhdistetaan tai ohjataan jätteenkäsittelyyn. Ulosmittausta varten valvonta-alueen rajoilla on tarkoitukseen varattuja automaattisia mittausskaappeja, joihin mitattavat tavarat asetetaan valvonta-alueen puolelta ja poistetaan tarkkailualueen puolelta.

3 Työntekijöiden säteilyannoksen lähdeterminit

Voimalaitostyöntekijöiden säteilyannoksesta valtaosa aiheutuu vuosihuollon aikaisista kunnossapito- ja tarkastustöistä sekä niihin liittyvistä avustavista töistä, jotka tehdään säteilevien laitoskomponenttien läheisyydessä. Säteilyannos on lähes yksinomaan ulkoista gammasäteilyä. Sisäinen annos ilma- tai pintakontaminaation seurauksena on harvinainen tapahtuma, niitä raportoidaan vuosittain kymmenkunta.

Työntekijöiden säteilyannoksen tärkein lähde on voimalaitoskomponenttien pinnoille kiinnittyneet korroosiotuotteet ja jäähdytteeseen liuenneet epäpuhtaudet kuten koboltti ja antimoni, jotka ovat aktivoituneet reaktorissa. Jäähdytteen aktivoitumistuotteet kuten ^{16}N ovat tyypillisesti niin lyhytikäisiä, että aiheuttavat säteilyvaaraa vain laitoksen teho käytön aikana. Polttoaineauriot ovat olleet Suomessa toistaiseksi suhteellisen pieniä, joten polttoaineesta vapautuneet fissiotuotteet ovat aiheuttaneet vain pienen osan työntekijöiden säteilyannoksesta.

Saatu ulkoinen säteilyannos on annosnopeuden ja säteilevässä huonetilassa vietetyn ajan tulo. Töiden määrä ja töihin kuluva aika pyritään pitämään mahdollisimman pienenä jo taloudellisista syistä: jokainen seisokkiin kuluva tunti maksaa tuotannonmenetyksenä merkittäviä summia. Työntekijöiden säteilyannoksen pienentämiseksi onkin pyritty pienentämään annosnopeuksia puhdistamalla laitoskomponentteja aktiivisista epäpuhtauksista ja poistamalla aktivoitumistuotteiden lähteitä primäärijäähdytteen kanssa kosketuksiin tulevista laitoskomponenteista.

3.1 Jäähdytteen aktivoitumistuotteet

Valtaosa ydinvoimalan radioaktiivisten aineiden inventaariosta syntyy ja pysyy polttoainesaauvojen sisällä. Reaktorin voimakas neutronivuo kuitenkin aktivoi myös reaktorin rakenteissa käytettyjä materiaaleja sekä reaktorin läpi virtaavaa jäähdytettä. Säteilysuojellisesti merkittävin jäähdytteen aktivoitumistuote on sekä nopeiden että termisten neutronien aiheuttamassa $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ -reaktiossa syntynyt typen isotooppi. Sen puoliintumisaika on vain n. 7,13 sekuntia [17] ja hajoamisessa vapautuu jopa 10,42 MeV energiaa. Energia vapautuu joko suoraan β^- -hajoamisen yhteydessä tai tytärytimen viritystilän laukeamisen yhteydessä gammakvanttina.

Beetahiukkaset läpäisevät materiaalia huonosti, joten ne eivät aiheuta merkittävää suoraa säteilyannosta työntekijöille. Suurenergisten, usean MeV:n, beetahiukkasten hidastumisesta aiheutuva jarrutussäteily sen sijaan voi aiheuttaa säteilyannosta matkan päästä. Suurin säteilyvaara ^{16}N :sta aiheutuu kuitenkin sen hajoamisessa syntyvästä gammasäteilystä. Noin 72 prosentissa ^{16}N :n hajoamisista syntyy yli 6 MeV:n gammasäteilyä, joka läpäisee materiaalia tehokkaasti.

Lyhyt puoliintumisaika ja voimakas gamma- ja jarrutussäteily tekevät ^{16}N :sta merkittävän säteilyriskin laitoksen käydessä. Kiehutusvesilaitoksen turbiinirakennuksen merkitävät käynninaikaiset säteilytasot johtuvat pääosin ^{16}N :sta. Sen aktiivisuus kuitenkin vähenee nopeasti reaktorin alasajon jälkeen ja seisokin aikana säteilyriski aiheutuu etupäässä jäähdytteen mukana kulkeutuneista ja aktivoituneista korroosiotuotteista [12].

Synnyttyään reaktorin läpi kulkevassa jäähdytteessä ^{16}N -atomi muodostaa jonkin kemiallisen yhdisteen vapaiden atomien tai molekyylien kanssa. Pääosin vedestä koostuvassa jäähdytteessä reaktiivisimpia yhdisteitä ovat veden radiolyysissä syntyneet happi- ja vetyradikaalit [18]. Syntyneet typpi-yhdisteet kulkeutuvat painevesilaitoksessa primääri-

kierron mukana höyrystimille ja sieltä pääkiertopumppujen kautta takaisin reaktoriin. Pääkiertoputkien ja höyrystimien läheisyydessä on siksi käytön aikana erittäin korkeat säteilytasot.

Kiehusvesireaktorissa typpiyhdisteiden käyttäytyminen riippuu niiden kemiallisista ominaisuuksista. Osa yhdisteistä kulkeutuu höyryfaasin mukana turbiineille ja joko tiivistyy muun lauhteen mukana syöttöveden epäpuhtauksiksi tai päätyy kaasumaisena lauhduttamista poistokaasun erottelujärjestelmään. Höyrystymättömät yhdisteet pysyvät jäähdytteeseen liuenneina ja jatkavat muun jäähdytteen mukana kiertoa reaktorissa. Jäähdytteen kemialliset ominaisuudet vaikuttavat tätä kautta kiehusvesilaitoksen turbiinirakennuksen säteilytasoihin. Pelkistävä eli vety-vesikemia aiheuttaa suuremmat säteilytasot kuin hapettava eli ns. normaalivesikemia [18]. Olkiluodon kiehusvesilaitokset ovat käyttäneet normaalivesikemiaa koko käyttöhistoriansa ajan [19].

Nopean neutronin aiheuttamassa reaktiossa $^{16}\text{O} (n,p) ^{16}\text{N}$ syntynyt energinen protoni voi törmätä toiseen happiyttimeen ja synnyttää uuden tyypiatomin reaktiolla $^{16}\text{O} (p,\alpha) ^{13}\text{N}$. Tämä typen isotooppi on β^+ -aktiivinen ja sen puoliintumisaika on 9,96 minuuttia. Emittoituneiden positronien maksimienergia on 2,22 MeV ja ne läpäisevät rakenteita merkittävästi huonommin kuin ^{16}N :n gammasäteily. Pidemmän puoliintumisaikan takia tämän isotoopin avulla voidaan kuitenkin tarkkailla typen kulkeutumista primääripiirissä erilaisten kemiallisten olosuhteiden vallitessa [18].

Tritiumia muodostuu jäähdytteessä pääosin kolmella tavalla: jäähdytysveden sisältämän deuteriumin neutroniabsorption kautta sekä litiumin ja boorin reagoidessa neutronien kanssa. Painevesilaitoksessa merkittävin yksittäinen tritiumin lähde on jäähdytteeseen liotetun boorin reaktiot neutronien kanssa. Jos jäähdytteen pH-arvon kontrollointiin käytetään litiumhydroksidia (LiOH), niin litiumin neutroniabsorptiossa syntyy myös huomattavia määriä tritiumia. Erityisesti ^6Li -isotooppi absorboi termisiä neutroneja tehokkaasti. Raskaampi ^7Li sen sijaan absorboi vain nopeita neutroneita, joten sen tritiumin tuotanto on huomattavasti pienempi. Olkiluoto 3:lla käytetään ^7Li :n suhteen rikastettua litiumhydroksidia jäähdytteen pH-arvon säätämiseen [20]. Loviisan painevesireaktoreissa pH:n kontrollointiin käytetään kaliumhydroksidia (KOH) [21], joten litiumin pitoisuus niiden jäähdytteessä on vähäinen. Deuteriumista syntyvän tritiumin määrä on selvästi pienempi kuin boorin tai litiumin reaktioista syntyvän, minkä takia kiehusvesilaitoksen boorittomassa jäähdytteessä syntyy jopa kaksi kertaluokkaa vähemmän tritiumia kuin painevesilaitoksessa [18].

Pienempi tritiumin lähde on vuoto polttoaine- ja säätösauvojen kuoren läpi [18]. Diffuundoituneella tritiumilla on merkitystä lähinnä kiehusvesireaktoreissa, sillä niiden jäähdytteessä ei ole booria tai litiumia, joten tritiumtasot ovat merkittävästi pienemmät kuin painevesilaitoksissa. Rikkoontuneet polttoaine-elementit ja säätösauvat lisäävät tritiumin määrää jäähdytteessä, mutta tähän vaikuttaa myös polttoaineen tai boorin karkaaminen vaurioituneista elementeistä ja niiden reaktiot neutronivuossa polttoainesauvan ulkopuolella.

Jäähdytteessä tritium esiintyy lähes pelkästään vetenä (HTO). Näin ollen sen erottaminen kevytvesireaktorin jäähdytteestä on hankalaa. Pääosa tritiumista poistuu primääripiiristä vaihdettavan veden mukana. Päästöt meriveteen ovat Suomessa pysyneet selvästi päästörajojen alapuolella [22]. Tritiumin beetahajoamisessa vapautuva energia on pieni, vain noin 18,6 keV [17], joten sillä on säteilysuojelullista merkitystä vain sisäisenä säteilylähteenä kontaminaation seurauksena. Suomen ydinvoimalaitostyöntekijöiltä ei ole mitattu merkittäviä sisäisiä annoksia tritiumista.

Jäähdytteen vesimolekyylien hapesta 0,037 % on isotooppia ^{17}O . Tällä isotoopilla on mahdollisuus $^{17}\text{O} (n,\alpha) ^{14}\text{C}$ reaktioon reaktorin neutronivuossa. Toinen syntymekanismi

on reaktio $^{14}\text{N} (n,p) ^{14}\text{C}$. Tämän reaktion vaikutus riippuu jäähdytteessä olevan typen määrästä. Typpeä on jäähdytteessä joko liuenneena kaasuna tai jäähdytteeseen lisättynä ammoniakkina. Ammoniakkia lisätään primäärijäähdytteeseen, jotta siitä vapautuva vety reagoisi veden radiolyysissä muodostuneen hapen kanssa ennen kuin happi aiheuttaa laitospuolella typpikaasulla tai ilmalla täytettyihin tiloihin ulottuvassa heikossa neutronivuossa. Hiili-14 reagoi veden radiolyysituotteiden eli happi- ja vetyradikaalien kanssa ja muodostaa hiilimonoksidia (CO), hiilidioksidia (CO₂) ja metaania (CH₄) [18]. Hiili-14 on pienenenerginen ($E_{\text{max}} = 156 \text{ keV}$) β^- -säteilijä.

Syntyneet yhdisteet poistuvat laitokselta pääasiassa kaasumaisten päästöjen mukana ympäristöön. Kaasumaiset yhdisteet on verraten helppo poistaa jäähdytteestä eivätkä ne jää laitospuolelle kiinni kuten kiinteät aktivoitumistuotteet. Tämän sekä pitkän puoliintumisaika (5730 vuotta [17]) ja matalan hajoamisenergian takia ^{14}C :n merkitys työntekijöiden säteilyannoksiin on vähäinen.

3.2 Jäähdytteen mukana kulkeutuvat korroosiotuotteet ja epäpuhtaudet

Reaktorin jäähdytteen kanssa tekemisissä olevat komponentit on päällystetty hyvin korroosiota kestäville aineilla tai valmistettu kokonaan tällaisista materiaaleista. Yleisimmät käytetyt materiaalit ovat ruostumaton teräs ja Inconel-niminen nikkeliseos. Näiden lisäksi primääripiirissä on muista materiaaleista valmistettuja pienempiä komponentteja kuten kobolttia sisältävällä stelliitillä päällystettyjä venttiilejä, hopeaa sisältäviä juotoksia sekä antimonilla impregnoitua grafiittia valmistettuja tiivisteitä. Vaikka materiaalit on valittu hyvän korroosiokestävyytensä ansiosta, niistäkin liukenee pieniä määriä korroosiotuotteita tai epäpuhtauksia primäärikiertoon. Nämä hiukkaset tai yksittäiset ionit aktivoituvat reaktorissa ja näin syntyy jäähdytevirran mukana kulkeutuvia radioaktiivisia aineita, jotka kerääntyvät primääripiirin pinnoille ja aiheuttavat suurimman osan vuosihuoltoon osallistuvien työntekijöiden säteilyannoksista.

Korroosiotuotteiden aktivoituminen tapahtuu etupäässä polttoainesauvojen pinnalla. Kaikkien metallien pinnoille kertyy ilman tai veden vaikutuksesta oksidikerros. Loviisan primääripiiri kuumapestiin käyttöönottokokeiden yhteydessä, jotta primääripiirin pintaan kertyi puhdas oksidikerros. Tämän tarkoituksena oli vähentää oksidikerroksen myöhempää aktiivisuutta [24]. Oksidikerros ei kuitenkaan ole staattinen; kerroksen kasvu- ja kulumisprosessit kilpailevat jatkuvasti toistensa kanssa. Oksidikerros vaihtaa tämän takia ainetta ohi virtaavan jäähdytteen kanssa sekä yksittäisinä ioneina ja suurempina hiukkasina [18]. Reaktorissa esimerkiksi polttoainesauvan pinnalle tarttunut ja siinä aktivoitunut koboltti-ioni voi irrota polttoainesauvan oksidikerroksesta ja kulkeutua jäähdytevirtauksen mukana muualle. On huomattavaa, että aktiivisuutta kertyy kaikille primäärijäähdytteen kastelemille pinnoille, joten höyrystimet ja muut lämmönvaihtimet keräävät erityisen paljon aktivoituneita korroosiotuotteita ja epäpuhtauksia sillä ne muodostavat valtaosan primääripiirin pinta-alasta. Esimerkiksi Loviisan painevesilaitoksissa höyrystintuubit muodostavat 88 % primääripiirin pinta-alasta.

Korroosion hallinta on yksi laitoksen käyttösuunnittelun keskeisistä tavoitteista. Tähän pyritään muun muassa vesikemian jatkuvalla säädöllä. Jäähdytteeseen voidaan lisätä esimerkiksi vetyä tai hydratsiinia, jolloin jäähdytteen kemia muuttuu pelkistävämmäksi. Jäähdytteeseen lisätään myös epäjaloka metalleja kuten sinkkiä korroosion vähentämiseksi. Painevesilaitoksissa vesikemian yksi tehtävä on neutronitasapainon säätö veteen liuotetulla boorihapolla. Tätä kutsutaan kemialliseksi säädöksi (chemical shim) erotuk-

seksi säätösauvojen avulla tapahtuvaan reaktiivisuuden hallintaan. Kemiallisen säädön etu säätösauvoilla tapahtuvaan säätöön verrattuna on sen vähäinen vaikutus reaktorin tehojakaumaan. Säätösauva pienentää neutronivuota läheisyydessään, minkä takia tehotiheydessä ja polttoaineen palamassa voi olla voimakkaita paikallisia eroja.

Luonnon nikkelistä n. 68 % on isotooppia ^{58}Ni . Neutronivuossa tästä syntyy koboltin isotooppia ^{58}Co reaktiolla $^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58}\text{Co}$. Tämä isotooppi hajoaa 70 päivän puoliintumisaikalla ja tuottaa β^- - ja gammasäteilyä. Nikkeliä käytetään lähes kaikissa hyvin korroosioita kestävässä metalliseoksissa, joten sen määrän vähentäminen primääripiiristä on hyvin vaikeaa, ellei mahdotonta. Hyvästä korroosionkestävyydestään huolimatta näistäkin metalleista liukenee jonkin verran materiaalia primäärijäähdytteeseen. Korroosion nopeuteen vaikuttaa kemiallisen ympäristön lisäksi jäähdytteen suuri virtausnopeus putkistossa sekä korkeat lämpötilat. Reaktorin käynnistämisen ja sammuttamisen yhteydessä tapahtuvat lämpö- ja virtaustransientit lisäävät hetkellisesti veteen liuenneiden korroosiotuotteiden määrää. Painevesilaitoksilla tämä tapahtuu suurin piirtein samaan aikaan boorihapon lisäämisen kanssa, minkä takia ilmiötä kutsutaan booriipiikiksi. Vuosien varrella laitosten käyttötapaa on muutettu siten, että tehon nosto- ja laskuprosessien aikana vapautuisi mahdollisimman vähän aktivoituneita korroosiotuotteita jäähdytekiertoon.

Koboltilla on vain yksi luonnossa esiintyvä isotooppi, ^{59}Co . Tämä aktivoituu neutronivuossa kaappaamalla yhden neutronin ja muuttuu ^{60}Co :ksi. Tämä isotooppi on ongelmallinen säteilysuojelun kannalta, sillä sen hajoamisessa syntyy kaksi energistä (1,17 ja 1,33 MeV) gammakvanttia jotka läpäisevät suojarakenteita tehokkaasti. Koboltia on ydinvoimaloissa kobolttipitoisina materiaaleina kuten stelliittinä sekä nikkelin epäpuhtautena ruostumattomassa teräksessä ja nikkelseoksissa. Stelliittia on käytetty sen erinomaisen kulutuksenkestävyyden ansiosta liukupintojen päällystämiseen esimerkiksi venttiileissä [20].

Suomen ydinvoimalaitoksilla on käynnissä ohjelmat koboltin vähentämiseksi primääripiiristä. Tämä toteutetaan laitosten normaalin kunnossapito-ohjelman puitteissa siten, että koboltia sisältäviä komponentteja vaihdettaessa tilalle valitaan kobolttittomia materiaaleja. Pelkästään koboltin poistamiseksi ei muuten toimintakuntoisia komponentteja ole vaihdettu. Stelliittipinta-alaa on onnistuttu pienentämään Olkiluodon laitoksilla noin 40 % alkuperäisestä [25]. Olkiluodon laitoksella 60 – 70 % työntekijöiden annoksista aiheutuu ^{60}Co :stä [20]. Isotoopin 5,27 vuoden puoliintumisaika [26] tarkoittaa, että sen aktiivisuus pysyy käytännössä vakiona vuosihuollon aikana. Koboltin lähteen poistumisen jälkeen ^{60}Co :n aiheuttama aktiivisuus vähenee muutamien vuosien aikajänteellä.

Jotkin ydinvoimaloissa käytetyt materiaalit sisältävät hopeaa. Loviisan laitoksella noin 8-10 % primääripiirin pintojen aktiivisuudesta johtuu $^{110\text{m}}\text{Ag}$ -isotoopista. Hopean lähteeksi epäillään paineistimien sähkövastusten juotoksia. Noin 48 % luonnon hopeasta on isotooppia ^{109}Ag , joka aktivoituu neutronivuossa (n,γ) -reaktion kautta ja päättyy metastabiiliin tilaan $^{110\text{m}}\text{Ag}$. Tämä viritystila laukeaa noin kahdeksan kuukauden puoliintumisaikalla β^- -hajoamisella, mikä yhteydessä vapautuu gammakvantti [26].

Loviisan voimalaitoksilla on pääkiertopumpuissa käytetty mekaanisia tiivisteitä, joissa kovametallista valmistettu kiekko ja antimonilla impregnoitu grafiitti puristuvat vastakain [27]. Antimonia käytetään parantamaan tiivisteen lämmönjohtokykyä, jottei grafiittia vasten hankautuva kovametalliekikko kuumene liikaa. Pumpun käynnistäessä tiivistevesi ei virtaa mekaanisen tiivisteen läpi kuten normaalikäytössä, joten pintojen välinen kitka on korkea. Tällöin mekaaninen kulutus irrottaa grafiitista antimonia, joka päättyy tiivisteveteen. Antimonin reaktoriin pääsyn estämiseksi käynnistykseen yhteydessä tiivistevesi ohjataan suoraan lattiaviemäröinnin kautta puhdistusjärjestelmiin eikä primääripiiriin kuten tehokäytön aikana. Pumpun käydessä ja tiivisteveden virratessa normaalis-

ti antimonin liukenee veteen kemiallisesti, mutta näin vapautuvan antimonin määrä on selvästi pienempi kuin pumppujen käynnistyttyä yhteydessä.

Taulukko 3: Tärkeimpiä aktivoitumistuotteita ydinvoimaloissa

Aktivoitumis- tuote	Alkuperäinen isotooppi	Säteilylaji *	Vapautuva energia [MeV]	Puoliintumisaika
Co-58	Ni-58	EC + β^+	2,31	70,9 d
Co-60	Co-59	$\beta^- + 2 \gamma$	2,82	5,27 y
Sb-122	Sb-121	$\beta^- + \text{EC}$	1,98	2,72 d
Sb-124	Sb-123	$\beta^- + \gamma$	2,90	60,2 d
Ag-110m	Ag-109	$\beta^- + \gamma$	2,89	249,8 d
Mn-54	Fe-54	EC + γ	1,38	312 d
Fe-59	Fe-58	$\beta^- + \gamma$	1,57	44,5 d
Cr-51	Cr-50	EC + γ	0,75	27,7 d
Zr-95	Zr-94	$\beta^- + \gamma$	1,12	64,0 d
Nb-95	Zr-95	$\beta^- + \gamma$	0,93	35,0 d
Zn-65	Zn-64	EC + β^+	1,35	244,3 d

* EC = elektronikaappaus

Vuoden 2012 vuosi- ja huollossa vaihdettiin LO1-laitoksen yhteen pääkiertopumppuun uusi antimoniton hartilla impregnoitu tiiviste. Vuoden aikana saatujen hyvien käyttökokeusten jälkeen uusi tiiviste vaihdettiin kuuteen muuhun pääkiertopumppuun vuoden 2013 vuosi- ja huollossa [28]. Koska antimoni on aiheuttanut jopa puolet Loviisan laitoksen primääripiirien säteilytasoista, tämän toimenpiteen uskotaan pienentävän säteilyannoksia merkittävästi [29].

Jäähdytteeseen liuenneet antimonin aktivoituvat isotoopeiksi ^{122}Sb ja ^{124}Sb joiden hajoamisessa vapautuu MeV-luokan gammakvantteja. Lyhytikäisemmän ^{122}Sb -isotoopin puoliintumisaika on alle kolme päivää [26], joten sen aiheuttamaan säteilyannokseen voidaan vaikuttaa vuosi- ja huollon töiden ajoituksella. Jo muutaman päivän aikataulumuutoksella on suuri vaikutus tästä isotoopista saatavaan säteilyannokseen. Pitkäikäisemmän ^{124}Sb -isotoopin noin kahden kuukauden puoliintumisaika tarkoittaa, että siitä koituvaa annosta ei voida välttää töiden aikataulutusella.

3.3 Muut lähdeterminit

Käynnissä oleva ydinreaktori on erittäin voimakas neutroni- ja gammasäteilyn lähde. Neutronisäteilyä aiheuttaa fissioreaktioiden lisäksi reaktorissa syntyneestä ^{17}N -isotoopista. Tämä isotooppi lähettää β^- - ja neutronisäteilyä. Sen puoliintumisaika on n. 4,2 sekuntia, eli siitä aiheutuva säteilyriski poistuu nopeasti reaktorin sammuttua. Työntekijät voivat altistua neutronisäteilylle käytön aikana käytännössä vain Loviisan voimalaitoksen primääripumppujen luona tehtävissä töissä. Pumppukuoppiin tulee neutronisäteilyä suoraan reaktorista sekä pieniä määriä jäähdytteen mukana kulkevasta ^{17}N -isotoopista.

Käytetty polttoaine on myös voimakas neutronilähde. Olkiluodon laitoksella on todettu, että käytetty polttoaine on ainoa vartenotettava neutronisäteilylähde. Käytetyn poltto-

aineen siirtosäiliön pinnalta on mitattu neutroniannosnopeuksia, joiden suuruus on noin 100 $\mu\text{Sv/h}$ ja metrin päässä kuljetussäiliöstä noin 50 $\mu\text{Sv/h}$. Neutroniannosnopeus on noin kolme kertaa suurempi kuin gammasäteilyn aiheuttama annosnopeus. TVO selvittää vuoden 2014 aikana, voiko työntekijöille aiheutua kirjauskynnyksen ylittäviä neutroniannoksia poikkeustilanteissa, esimerkiksi kuljetuksen viivästyessä [30].

Normaaleissa käyttöolosuhteissa polttoaineessa syntyvät fissiotuotteet pysyvät polttoainesauvojen sisällä eivätkä kulkeudu jäähdytteen mukana muualle laitokseen. Poikkeuksen muodostavat polttoaineauriot, joissa polttoainesauvan suojakuori rikkoutuu jolloin radioaktiivisia fissiotuotteita vapautuu jäähdytekiertoon. Pienissä niin sanotuissa pin-hole -vuodoissa vapautuu lähinnä kaasumaisia ja helposti kaasuntuvia aineita, etupäässä jalokaasuja ja jodia. Jos polttoainesauvan kuoreen syntyy suurempi aukko tai sauva repeää katki, jäähdytevirta voi viedä mukanaan polttoainepelletin osia, murusia tai jopa kokonaisia pellettejä [31]. Tällöin fissioita voi tapahtua polttoaineen suojakuoren ulkopuolella, jolloin syntyneet fissiotuotteet vapautuvat suoraan jäähdytevirtaan.

Polttoaineaurio voi johtua esimerkiksi vierasesineen aiheuttamasta kulumasta tai polttoainepelletin murtumisesta esimerkiksi liian nopean tehonnoston seurauksena. Keraamisten polttoainepellettien ja zirkoniumseoksesta valmistettujen polttoainesauvan kuorien välissä on kaasurako, johon kaasumaiset fissiotuotteet pääsevät vapautumaan. Polttoainepelletti voi korkean palaman tai äkillisen tehonmuutoksen seurauksena muuttaa muotoaan siten, että se puristuu jostain kohtaa kiinni suojakuoreen. Tällöin se voi aiheuttaa suojakuoren murtumisen joko suoraan mekaanisen kuormituksen kautta tai siten, että pelletistä vapautuvat fissiotuotteet kuten jodi, kadmium ja kesium haurastuttavat suojakuorta kunnes se murtuu mekaanisesta rasituksesta [31]. Jos pelletistä valmistuksen yhteydessä lohjennut pala puristuu pelletin ja suojakuoren väliin, on polttoaineaurion riski tällöin suurempi. Suojakuori voi vaurioitua myös pelletin terävän kulman aiheuttaman epätasaisen kuormituksen takia [31].

Myös vety haurastuttaa zirkonium-seoksesta valmistettuja suojakuoria. Vety diffusoituu helposti zircaloy-metalliin ja muodostaa zirkoniumhydridiä, jonka vetolujuus on selvästi zircaloy-metallia heikompi. Vety voi joutua kosketuksiin suojakuoren sisäpuolen kanssa, jos suojakuoreen tulee reikä, josta jäähdytevettä pääsee polttoainesauvan sisälle. Tällöin reiästä sauvaan virtaava vesi höyrystyy jolloin höyry hapettaa kuumia polttoainepellettejä sekä sauvan suojakuoren sisäpintaa. Tällöin vapautuu vetyä, joka reagoi suojakuoren kanssa haurastuttaen sitä. Haurastunut suojakuori voi revetä esimerkiksi polttoainepelletin laajenemisen aiheuttaman rasituksen takia.

Kaasumaiset fissiotuotteet kulkeutuvat kiehutusvesilaitoksella höyryvirtauksen mukana turbiineille ja poistuvat lauhduttimesta poistokaasun käsittelyjärjestelmään. Kaasumaiset epäpuhtaudet ohjataan lauhduttimista rekombinaatiojärjestelmän (348) kautta poistokaasujärjestelmään (341), missä kaasuja viivästetään ja ennen niiden suodatusta poistokaasujen suodatusjärjestelmässä (749) ja poistamista laitoksen ilmastointipiipusta. Poistokaasujen suodatusjärjestelmän suodattimet poistavat kaasuvirtauksesta hiukkasmaiset epäpuhtaudet, molekyyllisen jodin ja metyylijodidin. Jalokaasut vapautuvat viivästyksen jälkeen ilmakehään. Reaktorin sammuttamisen jälkeen turbiineja tuuletetaan tarvittaessa jodin poistamiseksi, kunnes aktiivisuustaso on laskenut huoltotöiden aloittamiseen kelpaavalle tasolle.

Loviisan painevesilaitoksilla reaktorissa radiolyysin kautta syntyvät kaasumaiset aineet päätyvät primääriveden puhdistusjärjestelmään (TC-järjestelmä). Tämä järjestelmä huolehtii primääriveden puhdistuksen lisäksi oikeasta kalium- ja ammonium-ionien pitoisuudesta primäärivedessä [32]. Epäpuhtaudet tarttuvat puhdistusjärjestelmän ioninvaihtohartsseihin. Kerran vuodessa, muutama viikko ennen vuosihuoltoa käytetyt hartsit

ohjataan nestemäisten jätteiden varastojärjestelmään (TW), mistä ne aikanaan päätyvät kiinteytyslaitokseen ja laitosjäteluolaan [33].

Jalokaasut ja jodi eivät ole aiheuttaneet merkittävää sisäistä säteilyannosta voimalaitos-työntekijöille, sillä polttoaineaurio havaitaan laitoksen käydessä jäähytekemian muutoksista. Huoltotöissä käytetään tällöin tarpeen mukaan hengityssuojaimia, jotka estävät tehokkaasti radioaktiivisten aineiden pääsyn kehoon. Suojavarusteiden käyttö kuitenkin hidastaa työntekoa, minkä takia ulkoinen säteilyannos vuosihuollossa voi kasvaa töihin käytetyn ajan mukana. Suojavarusteet voivat myös lisätä työn fyysistä kuormittavuutta tiloissa, joissa on muutenkin kuumaa ja ahdasta. Suojavarusteiden käyttö onkin aina mitoitettava tosiasiallisen kontaminaatioriskin mukaan.

4 Laitoksilla tehtyt muutostyöt ja lähdetermin pienentäminen

Sekä Loviisan että Olkiluodon voimalaitosten nettotehoa on nostettu niiden käyttöiän aikana. Tehonnostot on saavutettu osittain parantamalla laitoksen hyötysuhdetta mm. uusimalla turbiineja ja osittain nostamalla reaktorien lämpötehoa. Ydinreaktorin lämpöteho on suoraan verrannollinen fissioiden lukumäärään aikayksikössä ja siten myös neutronivuohon. Kasvanut neutronivuo lisää myös aktivoitumistuotteiden syntynopeutta. Toisaalta myös reaktorin läpi pumpattavan jäähdytevirtauksen kasvu voi lisätä korroosiotuotteiden irtoamista primääripiirin pinnoilta. Virtausolosuhteet vaikuttavat vesikemian ohella epäpuhtauksien määrään ja kiinnittymiseen primääripiirin ja apujärjestelmien pinnoille. Virtauksen muuttamisella voi siten olla vaikutusta radioaktiivisten epäpuhtauksien kulkeutumiseen laitoksella.

Laitosten muutostöillä voidaan vaikuttaa myös suoraan jäähdytevirtauksen korroosiotuotekonsentraatioon ja sitä kautta aktivoitumistuotteiden määrään. Yksi tapa on vähentää aktivoitumiselle alttiiden aineiden kuten koboltin ja antimonin määrää jäähdytteen kanssa tekemisiin tulevista laitteista. Kaikilla suomalaisilla laitoksilla onkin uusittu aikanaan kobolttia sisältävällä stelliitillä pinnoitettuja komponentteja kuten venttiileitä koboltittomilla vaihtoehtoilla. Tämä vähentää jäähdytteeseen päätyvän ^{59}Co :n määrää ja sitä kautta ^{60}Co :n syntyvauhtia. Tästä syntyvät annossäästöt näkyvät kuitenkin vasta vuosien päästä, sillä ^{60}Co :n yli viiden vuoden puoliintumisaika takia sen määrä laitostekomponenttien pinnoilla pienenee uutta aktivoitumista vastaavaksi varsin hitaasti. Olkiluodon voimaloiden alkuperäinen stelliittipinta-ala oli 93,5 dm². Vuonna 2013 stelliittipintaa oli OL1-laitoksella 53,6 dm² ja OL2-laitoksella 55,4 dm². Stelliittipinnan määrää on siis vähennetty 43 % ja 40 % [25].

Koboltin lisäksi toinen merkittävä aktivoitumistuote on antimoni, josta aiheutuu Loviisan laitoksilla noin puolet höyrystintilan säteilytasosta [29]. Antimonin säteilysuojelullisesti merkittävin isotooppi on ^{124}Sb , jonka puoliintumisaika on noin 60 päivää. Antimonin tärkeimmäksi lähteeksi Loviisassa on päätelty pääkiertopumppujen akselitiivisteet. Tiivisteiden vaihtaminen antimonittomaan materiaaliin on yksi keino pienentää työntekijöiden säteilyannosta. Loviisan laitoksella yhden pääkiertopumpun tiiviste vaihdettiin antimonittomaan vaihtoehtoon vuosihuollossa 2012 ja kuusi muuta vuoden 2013 vuosihuollossa [28].

4.1 Loviisan laitosyksiköiden eroavaisuudet

Loviisa 1 valmistui vuonna 1977 pitkälti alkuperäisten piirustusten mukaisesti. Paineenkestävän suojarakennuksen takia höyrystintilasta tuli selvästi ahtaampi kuin muilla VVER-440–tyypin laitoksilla. Tilanahtauden takia höyrystintiloissa tehtävien huolto-, korjaus- ja tarkastustöiden aikana työntekijät joutuvat hyvin lähelle säteilevien järjestelmien putkia ja liikkuminen tilassa on vaivalloista ja hidasta.

Tilanteen parantamiseksi Loviisa 2:sta rakennettaessa höyrystintilaa muutettiin helppokulkuisemmaksi. Varsinkin vesitys- ja ilmausputkien sijoittelua parannettiin työntekijöiden liikkumisen helpottamiseksi. Tämän ansiosta säteilevässä tilassa vietetty aika on pienempi ja tätä kautta höyrystintilasta saadut säteilyannokset vähäisempiä [34]. Myös muualla laitoksella on putkistojen yms. komponenttien sijoittelua muutettu, minkä ansiosta liikkuminen ja huoltotöiden tekeminen on Loviisa 2 –yksiköllä helpompaa kuin Loviisa 1:llä.

On esitetty, että vuosihuoltojen toteuttaminen LO2 – LO1 –järjestyksessä voisi alentaa säteilyannoksia verrattuna käytettyyn LO1 – LO2 –järjestykseen [34]. Näin saavutettu annossäästö perustuisi oppimisvaikutukseen. Vuoden ensimmäinen vuosihuolto on työntekijöiden kannalta haasteellisempi kuin jälkimmäinen, sillä edellisestä kerrasta on kulunut lähes vuosi, minkä lisäksi osa tekijöistä on vaihtunut. Peräkkäisistä vuosihuolloista jälkimmäinen sujuu kokemusten mukaan jouhevammin.

4.2 Loviisa 1:n höyrystimien YB13 ja YB15 dekontaminointi vuonna 1980

Loviisan ensimmäisenä valmistuneen laitostyöyksikön kaksi höyrystintä dekontaminoitiin vuonna 1980. Dekontaminointimenetelmäksi valittiin ns. APOX-menetelmä, missä aktivoitumistuotteita sisältävä oksidikerros hapetetaan emäksisellä permanganaattiliuoksella ennen pelkistävää oksaalihiappokäsittelyä. Dekontaminointi onnistui periaatteessa hyvin, dekontaminointikerroin oli noin 600, mutta höyrystimet rekontaminoituivat pahasti [35]. Rekontaminaation seurauksena säteilytasot käsiteltyjen höyrystimien läheisyydessä ovat jopa viisi – kymmenen kertaa suurempia käsittelemättömiin höyrystimiin verrattuna.

Käsittely oli ilmeisesti ollut liian voimakas ja liuottanut koko oksidikerroksen perusmetallin päältä. Pintoihin syntyi uusi oksidikerros tilanteessa, jossa höyrystimissä kiersi taas aktivoitumistuotteita sisältävää primääriä. Tällöin oksidikerrokseen kertyi aiempaa huomattavasti enemmän aktivoitumistuotteita ja muita epäpuhtauksia. Erityisesti antimonია on jopa kymmenen kertaa enemmän näiden höyrystimien oksidikerroksissa kuin muissa höyrystimissä.

4.3 Loviisa 2:n primääripiirin dekontaminointi vuonna 1994

Loviisan ydinvoimalaitoksen LO2-yksikön koko primääripiiri dekontaminoitiin vuonna 1994 [36]. Dekontaminointiin ryhdyttiin, sillä etenkin höyrystintilassa annosnopeudet olivat kasvaneet merkittävän suuriksi ja vuoden 1994 vuosihuollossa uusittiin höyrystimien ulospuhallusjärjestelmän (RY) putkisto. Tämän työn kesto oli noin 10000 henkilötyötuntia ja työstä aiheutunut kollektiivinen annos noin 274 mSv [37]. Ilman dekontaminaatiota työstä olisi aiheutunut kestävästi suuremman säteilyannokset. Loviisan vuosiraportin mukaan arvioitu annossäästö dekontaminaatiosta oli noin 8 manSv.

Primääripiiri dekontaminoitiin CORD-UV-menetelmällä, joka on aiemmin käytettyä APOX-menetelmää hellävaraisempi. Tämä on Siemensin kehittämä kaksivaiheinen menetelmä, jossa puhdistettavan järjestelmän metallipinnat ensin hapetetaan permanganaanihapolla HMnO_4 ja sen jälkeen pelkistetään oksaalihapolla $(\text{COOH})_2$ [35]. Loviisan laitoksen primääripiirin pinnat ovat lähes yksinomaan ruostumatonta terästä, jonka pinnalla on paljon kromia sisältävä oksidikerros. Kromi on tässä kerroksessa kolmiarvoisina veteen liukenemattomina Cr^{3+} -ioneina. Permanganaanihappo hapettaa nämä ionit veteen paremmin liukeneviksi Cr^{6+} -ioneiksi. Hapetuskäsittelyn jälkeen oksidikerros liuotetaan oksaalihapolla jolloin siihen sitoutuneet epäpuhtaudet kuten aktivoitumistuotteet vapautuvat jäähdytekiertoon, mistä ne poistetaan ioninvaihtimilla.

Oksaalihappo hajottaa permanganaanihapon, joten prosessissa syntyy vain yksi jäteliuos, joka voidaan puhdistaa laitoksen omilla ioninvaihtimilla. Oksaalihappo hajotetaan ultraviolettivalolla vedeksi ja hiilidioksidiksi ennen poistoveden ohjaamista puhdistusjärjestelmiin. Tämä vähentää tarvittavan ioninvaihtohartsin määrää [38]. Dekontaminaatio-

prosessia varten laitokseen oli asennettava vain yksi lisäkomponentti, ultraviolettivalaisin oksaalihapon hajottamiseksi.

Dekontaminoinnin jälkeen putkistot huuhdellaan ja passivoidaan. Passivoinnin tarkoituksena on luoda puhdistetuille metallipinnoille valmis oksidikerros, johon ei ole sitoutuneena aktivoitumistuotteita. Näin pyritään välttämään laitoksen merkittävää rekontaminoitumista. Primääripiirin passivoimiseksi siihen syötettiin vetyperoksidia ja piirin lämpötila nostettiin 160 °C. Korkea lämpötila nopeuttaa vetyperoksidin hajoamista vedeksi ja hapeksi, jolloin vapautunut happi reagoi primääripiirin pintojen kanssa muodostaen pysyvän oksidikerroksen. Lämpötila ja vetyperoksidi myös hajottavat dekontaminaatiokemikaalien jäämät primääripiiristä [36].

Loviisa 2:n primääripiirin dekontaminaatio onnistui hyvin. Annosnopeuksien pienemiskerroin koko toimenpiteelle oli noin 10,5 ja höyrystimien kohdalla jopa 85 – 190 [35]. Arvioitu poistetun aktiivisuuden määrä oli 66 TBq, josta ⁶⁰Co:n osuus oli noin 32 TBq.

Primääripiirin dekontaminaatiota ei ole toistettu vuoden 1994 jälkeen, eikä laitoskomponenttien aktiivisuus ole sen jälkeen noussut aiemmalle tasolle. Dekontaminoinnin jälkeen työntekijöiden säteilyannokset ovat olleet Loviisa 2 –laitoksella pienemmät kuin Loviisa 1 –laitoksella vastaavan laajuisissa vuosihuolloissa (Kuva 6).

4.4 Olkiluodon laitosyksiköiden tehonkorotukset

Olkiluodon ydinvoimaloiden alkuperäinen lämpöteho oli 2000 MW per yksikkö ja nettosähköteho oli 660 MWe. Käyttökokemusten perusteella todettiin, että laitosten lämpötehoa ja hyötysuhdetta voitiin parantaa. Vuoden 1984 polttoaineenvaihto- ja vuosihuoltoseisokkien aikana laitosten lämpötehoa nostettiin 8 % 2160 MW:iin ja sähköteho nousi 710 MWe:iin. Vuonna 1998 laitosten modernisoinnin yhteydessä lämpötehoa nostettiin 2500 MW:iin, mikä vastaa 25 % korotusta alkuperäiseen lämpötehoon [39]. Nettosähköteho nousi tällöin 840 MWe:iin. Vuoden 1998 tehonkorotusten jälkeen höyrynkosteus nousi noin 0,1 prosentista 0,3 prosenttiin, sillä höyrynkuvaimet oli mitoitettu 2000 MW:n lämpöteholle [40]. Kosteuden mukana turbiinilaitokselle virtasi jäähdytteen aktivoituneita epäpuhtauksia, joista osa tarttui höyryputkiston pinnoille. Tämän seurauksena säteilytasot Olkiluodon laitosten turbiinirakennuksissa lähtivät nousuun (Kuva 1).

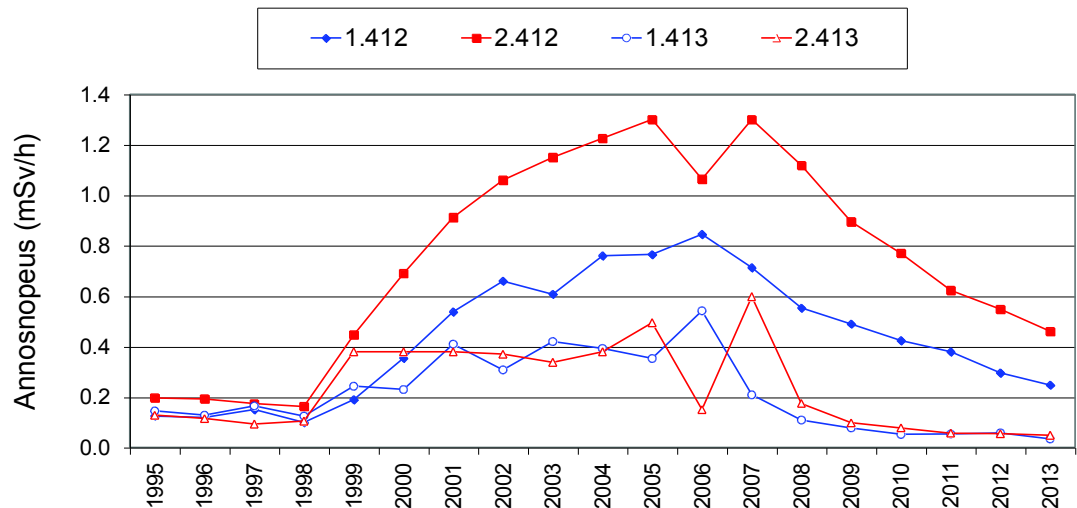
Höyrynkosteuden pienentämiseksi höyrynkuvaimet oli vaihdettava tehokkaampiin. Höyrynkuvainten vaihto toteutettiin turbiinilaitoksen modernisointihankkeen eli ns. TIMO-projektin yhteydessä 2005 – 2006. Turbiinilaitoksen modernisointi nosti laitosten nettosähkötehon 840:stä 860:een megawattiin. Suuret työt turbiinilaitoksella juuri niinä vuosina, kun höyrynkosteuden takia annosnopeudet turbiinilaitoksella olivat suurimmillaan, johtivat poikkeuksellisen suuriin vuosiansioksiin vuosina 2005 ja 2006 (Kuva 5). OL2-yksiköllä höyrynkuvain vaihdettiin vuoden 2005 vuosihuollossa. Uudessa höyrynkuvaimessa havaittiin kuitenkin ensimmäisen käyttöjakson jälkeen vaurioita virtauksen rajoittimien hitseissä. Höyrynkuvaimen korjauksen ajaksi asennettiin vanha kuvain takaisin vuonna 2006 ja uusi höyrynkuvain asennettiin lopullisesti vuonna 2007. OL1-yksikön höyrynkuvain vaihdettiin uuteen vuonna 2006.

Uudet höyrynkuvaimet ovat tehokkaampia kuin vanhemmat ja höyrynkosteus on pienentynyt alle 0,1 painoprosenttiin niiden käyttöönoton jälkeen. Annosnopeudet höyryputkien pinnoilla ja turbiinirakennuksessa ovat lähteneet selvään laskuun OL1-laitoksella vuoden 2006 ja OL2-laitoksella vuoden 2007 jälkeen (Kuva 1). Lasku johtuu

höyryputkien pinnoille tarttuneiden epäpuhtauksien radioaktiivisesta hajoamisesta sekä pintojen puhdistumisesta. Kuivempi ja siten puhtaampi höyry kuljettaa epäpuhtauksia höyryputkistosta ja turbiineilta lauhteenpuhdistusjärjestelmään. Alustavien tietojen mukaan säteilytasot turbiinirakennuksessa ovat laskeneet vuoden 2014 seisokkeihin mennessä edelleen noin 10 – 15 % edellisestä vuodesta.

Annosnopeudet 412 - ja 413-linjoissa 1995 -2013

412 välitulistusjärjestelmä, alivirtausputket
413 turbiinin päähöyryputkisto

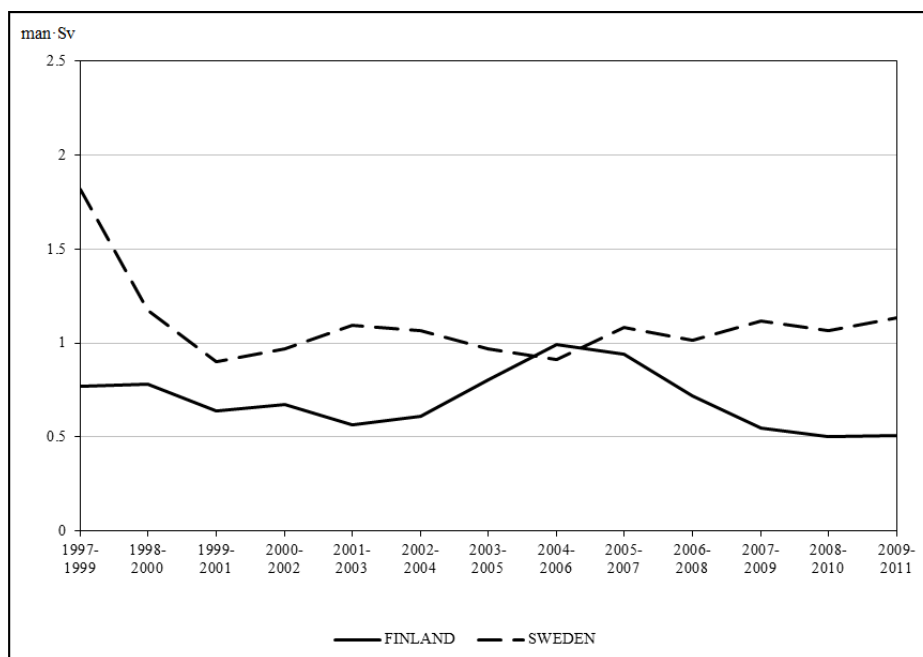


Kuva 1: Olkiluodon voimalaitoksen höyrylinjojen annosnopeuksia. Kuvan on laatinut Jukka Henttinen.

5 Työntekijöiden saamat säteilyannokset

Työntekijöiden saamat säteilyannokset suomalaisilla ydinvoimalaitoksilla ovat pienentyneet Olkiluodossa 80-luvun lopusta ja Loviisassa 90-luvun alusta lähtien. Olkiluodon säteilyannokset ovat pieniä verrattuna samanlaisiin laitoksiin Ruotsissa. Ruotsissa on tällä hetkellä käytössä kymmenen reaktoria, joista seitsemän on kiehutusvesilaitoksia ja loput kolme ovat painevesireaktoreja. Näiden lisäksi kaksi kiehutusvesireaktoria Barsebäckissä on poistettu käytöstä. Nettosähköteholtaan kiehutusvesilaitokset ovat 473 MW:n (Oskarshamn-1) ja 1400 MW:n (Oskarshamn-3) väliltä [41]. Nettosähkötehon keskiarvo on noin 910 MWe, kun suomalaisten Olkiluoto-1 ja -2 -laitosten nettosähköteho on 880 MWe. Voimaloiden sähkötehoissa ei ole merkittävää eroa, joten reaktori-kohtaisia säteilyannoksia voidaan vertailla ainakin kvalitatiivisesti. Vertailua mutkistaa se, että voimalaitokset eivät ole aivan samanlaisia. Oskarshamn-1 ja -2 sekä Ringhals-1 ovat Olkiluodon laitosyksiköitä vanhempaa tyyppiä. Forsmark-1 ja -2 ovat rakenteeltaan lähimpänä Olkiluodon laitosyksiköitä. Oskarshamn-3 ja Forsmark-3 ovat uudempia laitoksia.

IAEA:n ja OECD:n Nuclear Energy Agencyn yhteisesti rahoittaman työperäisistä säteilyannoksista tietoa keräävän ISOE:n (Information System on Occupational Exposure) tilastojen mukaan Olkiluodon laitosyksiköiden kollektiiviannokset ovat olleet noin puolet pienempiä kuin ruotsalaisilla laitoksilla kertyneet annokset [42]. Poikkeuksen muodostavat vuosien 2005 ja 2006 suurista muutostöistä Olkiluodossa aiheutuneet annokset. Kuvassa (Kuva 2) on piirrettynä suomalaisten ja ruotsalaisten kiehutusvesireaktorioiden työntekijäannokset.

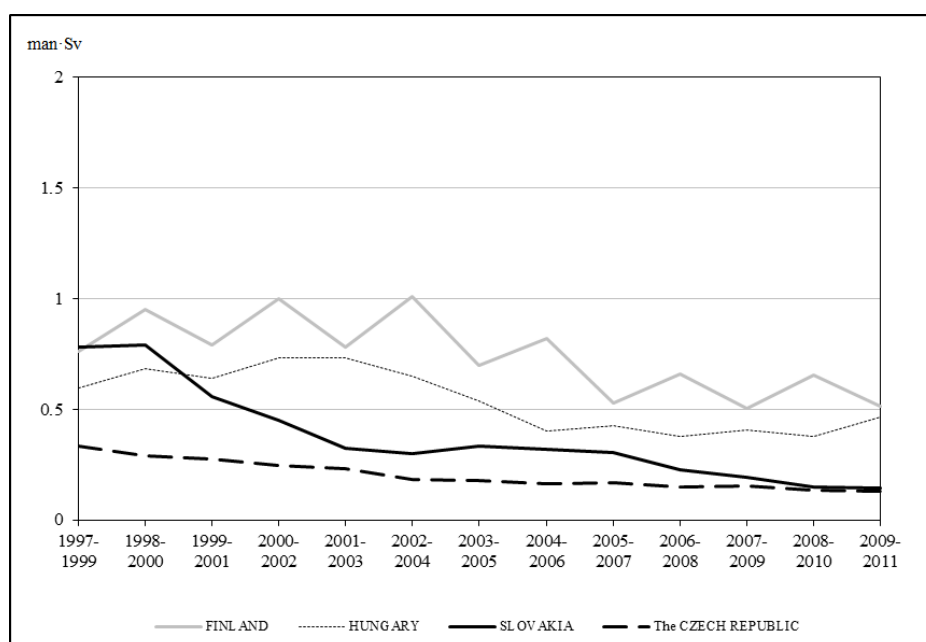


Kuva 2: Työntekijöiden kollektiiviset säteilyannokset Olkiluodossa ja ruotsalaisilla kiehutusvesilaitoksilla. Kuva on peräisin ISOE:n raportista.

Loviisan säteilyannosten vertailua hankaloittaa se, ettei muilla VVER-440 -tyypin laitoksilla ole paineenkestävää suojarakennusta. Suojarakennuksen takia Loviisan laitosten höyrystintila on huomattavasti ahtaampi kuin samankaltaisilla laitoksilla. Ahtauden takia säteilyannokset ovat korkeita, sillä säteilylähteet ovat lähellä työntekijöitä ja huolto-työhön kuluu enemmän aikaa kuin helpommin luoksepäästävissä tiloissa. Euroopassa on VVER-440 -tyypin laitoksia Unkarissa (4), Tšekin tasavallassa (4) ja Slovakiassa (4) käytössä.

tössä, lisäksi kaksi poistettu käytöstä ja kaksi rakenteilla) [41], nämä yksiköt on rakennettu Loviisan voimalaitoksen jälkeen. Näiden lisäksi yhdeksän yksikköä on käytössä ja kolmesta on poistettu käytöstä entisessä Itä-Saksassa, muualla Itä-Euroopassa ja entisen Neuvostoliiton alueella.

Loviisan voimalaitosta voidaan pitää VVER-440 –konseptin vedenjakajana. Loviisaa ennen rakennetut laitokset ovat V-230 –tyyppiä, missä mm. jäähdytteenmenetyssonnettomuuteen varautuminen on selvästi heikompaa. Loviisan voimalaitoksen yksiköt ovat ensimmäiset tyyppin V-213 laitosyksiköt. Kaikkien kahdentoista edellä mainitun eurooppalaisen yksikön tyyppimerkintä on myös V-213, mutta niiden rakenne eroaa Loviisan laitosyksiköistä. Näillä laitoksilla on paineenkestävän suojarakennuksen sijaan kaasutiiviit suojaosastot reaktorirakennuksessa. Jäähdytteenmenetyssonnettomuudessa vapautuva höyry johdetaan vesialtailla varustettuun lauhdutustorniin. Tällaisen ratkaisun huonoja puolia ovat reaktorirakennuksen puutteellinen tiiveys sekä huono suoja ulkoisia tapahtumia vastaan [43].



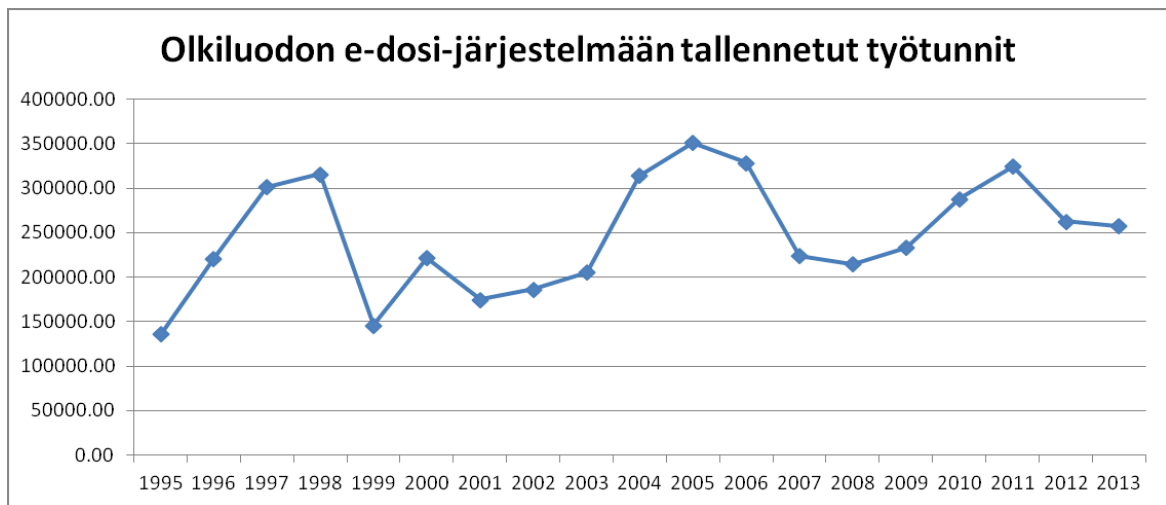
Kuva 3: Työntekijöiden kollektiiviset säteilyannokset Loviisassa sekä kolmessa muussa Euroopan maassa sijaitsevilla VVER-440 -laitoksilla. Kuva on peräisin ISOE:n julkaisusta.

Loviisan voimalaitoksen säteilyannokset ovat suuremmat kuin Unkarin, Tšekin tasaval-
lan tai Slovakian VVER-440 V213 –laitoksilla [42]. Unkarin Paksissa sijaitsevan laitoksen reaktorikohtaiset annokset ovat pitkällä aikavälillä noin neljänneksen pienempiä kuin Loviisassa. Slovakian laitoksilla kertyneet säteilyannokset ovat yli puolet pienempiä kuin Loviisan reaktorikohtaiset annokset. Tšekin tasavallan Dukovanyssa sijaitsevien neljän laitoksen reaktorikohtaiset annokset ovat noin kolmasosa Loviisan vastaavista. Loviisan voimalaitoksen ainutlaatuinen rakenne johtaa työntekijöiden suurempiin säteilyannoksiin. Toisaalta ydinturvallisuuden kannalta Loviisan laitosten rakenne on parempi. Muun muassa turvallisuusjärjestelmien redundanssien erottelussa on merkittäviä eroja, millä on merkittävä vaikutus esimerkiksi tulipaloriskiin. Loviisassa kummallakin reaktorilla on oma kaasutiivis suojarakennuksensa, kun muilla laitoksilla kaksi reaktoria jakaa yhteisen reaktorihallin [43].

5.1 Kollektiiviset säteilyannokset

Voimalaitostyöntekijöiden saamat kollektiiviset säteilyannokset kasvoivat suomalaisilla ydinvoimaloilla noin 90-luvun alkuun asti, minkä jälkeen ne ovat lähteneet laskuun. Tämä on tulosta monen ilmiön yhteisvaikutuksesta. Laitosten ensimmäisinä vuosina säteilyannokset ovat pieniä, sillä laitoksen kontaminaatiotaso on vielä alhainen. Radioaktiivisten korroosiotuotteiden ja epäpuhtauksien kertyessä laitoskomponenttien pinnoille säteilytasot ja siten säteilyannokset kasvavat vuosi vuodelta.

Laitoksen kontaminaatiotaso ei kasva loputtomasti, vaan kasvu pysähtyy noin vuosikymmenen kuluttua. Tällöin radioaktiivisia aineita poistuu laitoskomponenteista radio-



Kuva 4: Vuosittaiset työtunnit Olkiluodon valvonta-alueella. Kuvasta näkyy vuosien 1998 sekä 2005 ja 2006 suuret muutostyöt sekä niitä valmistelevat työt.

aktiivisen hajoamisen ja pintojen puhdistumisen kautta yhtä paljon kuin uusia aktivointustuotteita syntyy reaktorissa. Kun säteilytasot eivät enää nouse, huoltotöiden tehokkuuden parantuminen johtaa pienempiin säteilyannoksiin. Ydinvoimalan kunnossapito ja varsinkin vuosihuolto ovat monimutkaisia kokonaisuuksia, ja tehokkaimpien työtapojen oppiminen vie aikaa. Vuosien kokemuksen kautta työtapoja, työjärjestystä ja työtehtäviin tarvittavaa miehitystä opitaan järjestämään yhä tehokkaammin.

Kollektiiviset säteilyannokset riippuvat paitsi laitoksen kontaminaatiotasosta ja työjärjestelyiden tehokkuudesta myös tehtävien töiden määrästä. Suuret vuosihuollot näkyvät myös suurina kokonaisannoksina aineistossa. Esimerkiksi Olkiluodon kokonaisannoksissa näkyy selvästi vuoden 1989 ylimääräinen huoltoseisokki, ns. hiekkaseisokki. Generaattorin jäähdytysjärjestelmän vesivuoto aiheutti laitoksen ajamisen seisokkiin 7.9.1989. Reaktoriohjaaja laukaisi pikasulun käsin havaittuaan ongelmia turbiinigeneraattori-järjestelmässä. Pikasulussa säätösauvat toimivat normaalisti, mutta pikasulkua palautettaessa viisitoista sauvaa ei liikkunut lainkaan. Syyksi paljastui säätösauvojen toimilaitteisiin joutunut metallijauhe [44]. Jauhe oli raekooltaan 0,1 – 0,5 mm ja koostumukseltaan samanlaista kuin hiekkapuhalluksessa käytettävä ruostumaton teräs jauhe [45]. Luultavasti vuosihuollon aikana muuttuneiden virtausolosuhteiden irrottaman jauheen puhdistaminen säätösauvojen toimilaitteista (221), sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmästä (321) sekä reaktoriveden puhdistusjärjestelmästä (331) kesti yhteensä 44 vuorokautta. Jauhetta löytyi yhteensä noin 3000 cm³. Ylimääräisen huol-

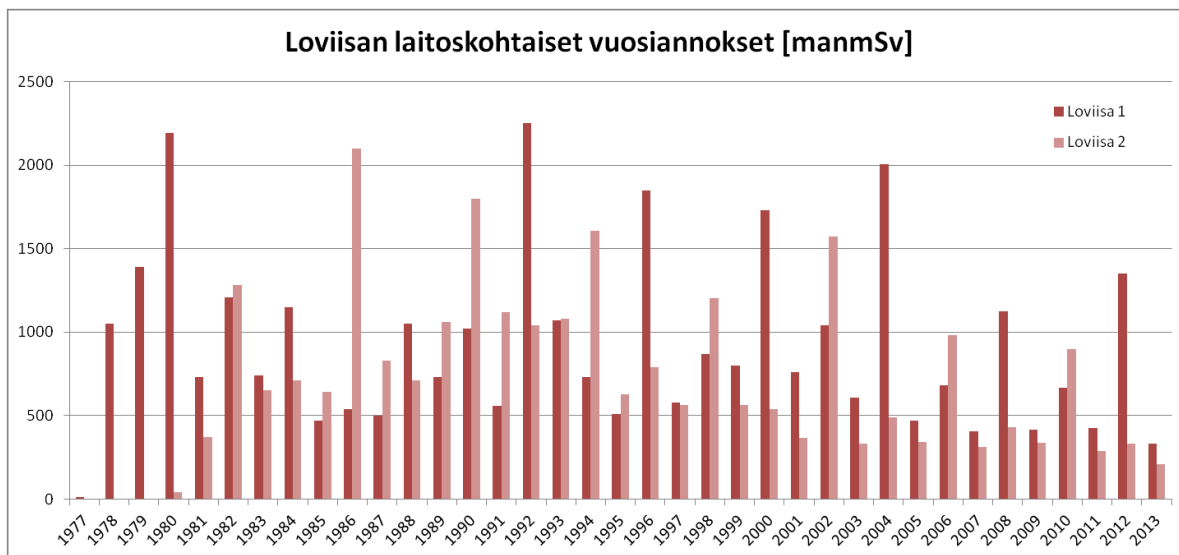
toseisokin aikana työntekijöille aiheutui noin 0,6 manSv:n ylimääräinen säteilyannos [44]. Pelkästään säätösauvojen toimilaitahuolto kesti 11477 henkilötyötuntia ja aiheutti 186,6 manmSv kollektiiviannoksen.

Vuonna 1992 OL1-laitoksella tehtiin vuosihuollon aikana laajat muutostyöt sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmän (321) ja reaktoriveden puhdistusjärjestelmän (331) putkistoihin. Muutostyöt tehtiin jännityskorroosioriskin vähentämiseksi. Työstä aiheutui 520 manmSv:n kollektiiviannos, mikä on yli viidennes koko vuoden kollektiivisesta annoksesta [46]. Lisäksi kyseisiin järjestelmiin liittyvistä venttiilitöistä kertyi noin 100 manmSv:n kollektiiviannos. Vuonna 1994 tehtiin vastaavat muutostyöt OL2 -laitokselle, jolloin säteilyannosta kertyi yhteensä 876 manmSv [47].

Vuosina 2005 ja 2006 Olkiluodon laitoksilla toteutettiin TIMO-projekti (Turbine Island Modernization). Näinä vuosina työntekijät säteilyannosta kertyi selvästi enemmän kuin 2000-luvun muissa vuosihuolloissa. Viitteelliseen trendiviivaan verrattuna kumpanakin vuonna työntekijöille kertyi noin 1 manSv enemmän kollektiivisesta annosta (Kuva 5). Näinä vuosina myös tuorehöyryjärjestelmien säteilytasot olivat suurimmillaan vuoden 1998 tehonkorotuksen jälkeen kohonneen höyrynkosteuden takia (Kuva 1). Turbiinilaitoksen uudistustyö vuosina 2005 ja 2006 näkyy myös työtuntien kasvuna (Kuva 4), mut-



Kuva 5: Olkiluodon voimalaitoksen laitoskohtaiset kollektiiviannokset



Kuva 6: Loviisan voimalaitoksen laitoskohtaiset kollektiiviannokset

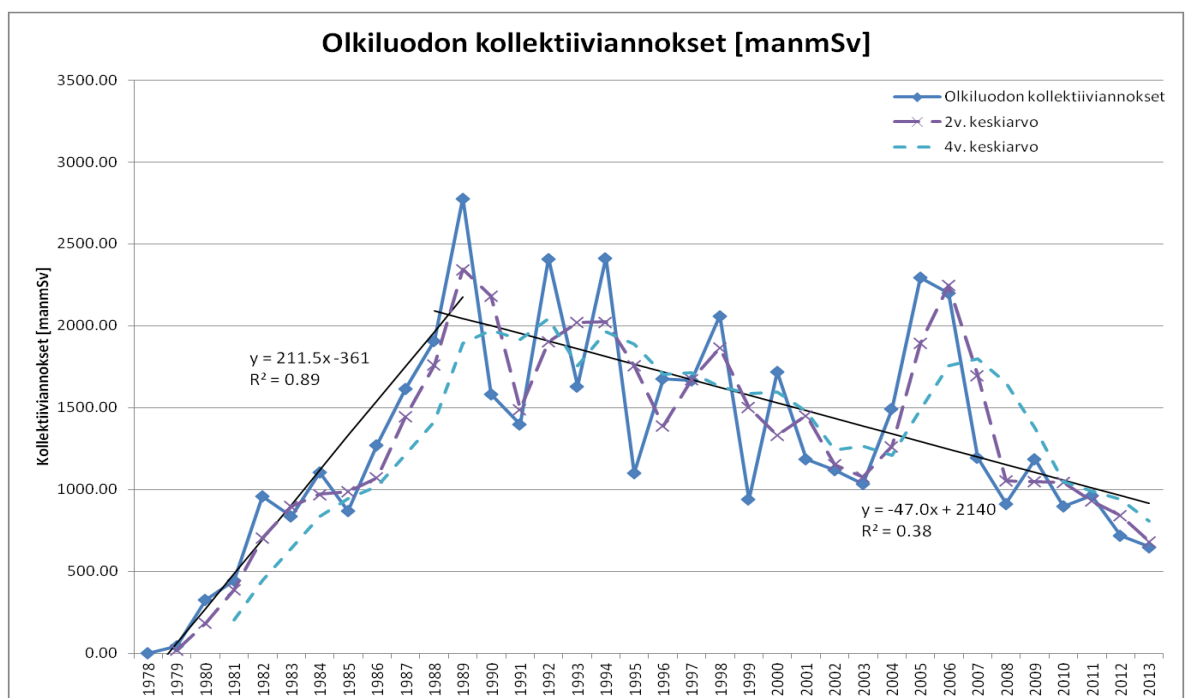
ta vaikutus on jonkin verran pienempi kuin kollektiiviannoksen kasvu. Työkohteiden sijainnilla korkean höyrynkosteuden kontaminoimassa turbiinirakennuksessa oli siis selvä vaikutus kollektiiviannoksen kasvuun.

Loviisan laitoksilla saatujen kollektiiviannosten kuvaajassa näkyy selvästi vuosihoitojen rytmitys. Loviisan voimalaitosyksiköillä on alusta lähtien käytetty kahdeksan vuoden vuosihoitorytmitystä [48], missä vuosihoitot jaetaan lyhyisiin, neljän ja kahdeksan vuoden vuosihoitoihin. Vuonna 1997 otettiin käyttöön neljäs vuosihoitotyyppi, polttoaineenvaihtoseisokki. Vuosihoitojen suunnitellut kestot ovat: polttoaineenvaihtoseisokki noin 18 vrk, lyhyt vuosihoito noin 24 vrk, 4-vuotishuolto noin 34 vrk ja 8-vuotishuolto noin 42 vrk.

Huoltotöiden jakamisella eripituisiin seisokkeihin pyritään säästämään sekä rahaa että säteilyannoksia. Lyhyissä huoltoseisokeissa voidaan esimerkiksi jättää joitakin laitoskomponentteja lyijyttämättä jos katsotaan, että itse lyijytystyöstä aiheutuisi suurempi säteilyannos kuin lyijysuojauksella säästettäisiin. Säteilysuojelun kolmesta kulmakivestä, ajasta, suojauksesta ja etäisyydestä korvataan tällöin suojaus ajalla ja säteilevässä tilassa tehdään mahdollisimman vähän töitä.

Vuonna 2004 Loviisa 1 -yksiköllä oli pitkä huoltoseisokki, jossa työntekijät saivat yhteensä 1,93 manSv kollektiiviannoksen koko vuoden säteilyannoksen noustessa 2,003 manSv:iin. Ydinenergian käyttöä koskevien turvallisuusvaatimusten eli YVL-ohjeiden osan YVL-7.9 mukaan yhden reaktorin käytöstä kertyneiden kahden peräkkäisen vuoden säteilyannosten keskiarvo sai olla korkeintaan 2,5 manSv/GWe, mikä tarkoittaa 1,22 manSv:iä Loviisan yksiköille [3], [4]. Kollektiiviannosten keskiarvo vuosilta 2003 ja 2004 olivat 1,306 ja 0,410 manSv:iä Loviisan 1- ja 2-yksiköille [49]. Tämän poikkeaman johdosta Säteilyturvakeskus edellytti Fortumin laativan aiheesta erikoisraportin, jossa eriteltiin ylitykseen johtaneet syyt ja korjaavat toimenpiteet.

Merkittävin raportin laatimisen jälkeen käyttöön otettu uudistus toimintatavoissa on ollut höyrystintilan töiden ajoittaminen siten, että höyrystimet voidaan pitää vedellä täytettyinä aina kun mahdollista. Höyrystinten primääripuolen putkisto käsittää noin 88 %



Kuva 7: Olkiluodon voimalaitoksen kollektiiviannokset, kahden ja neljän vuoden liukuvat keskiarvot sekä viitteelliset regressiosuorat

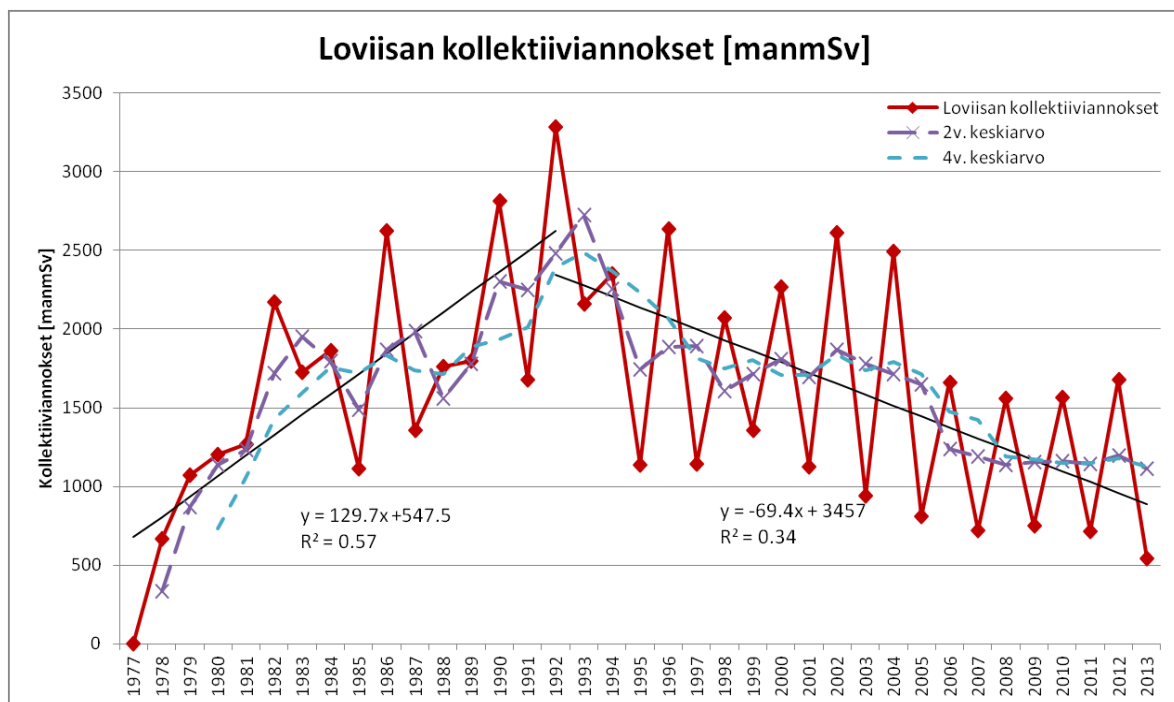
primääripiirin pinta-alasta. Niihin kertyy tämän takia valtaosa primääripiirin radioaktiivisista epäpuhtauksista. Höyrystinten lähellä tai sisällä tehtävät työt ovat tämän takia erityisen haasteellisia säteilysuojelun kannalta. Höyrystinten säteilytasoja voidaan alen-
taa pitämällä niiden primääri- ja sekundääripuolet vedellä täytettyinä, sillä vesi toimii tehokkaana säteilysuojana. Tämän toimintatavan käyttöönoton jälkeen Loviisan laitok-
sen kollektiiviset säteilyannokset ovat pienentyneet noin 0,5 manSv vuodessa [34].

5.1.1 Eniten altistuneen työntekijän annos

Kollektiiviannoksen lisäksi on hyödyllistä tarkastella työntekijöiden saamaa suurinta säteilyannosta kultakin voimalaitokselta. Kollektiiviannoksen suuruus johtuu pitkälti vuosihuollon laajuudesta ja laitoksen säteilytasosta. Yksittäisen työntekijän annokseen voidaan lisäksi vaikuttaa esimerkiksi hallinnollisilla keinoilla. Työntekijä voidaan siirtää työtehtäviin, joissa kertyy vähemmän säteilyannosta jos hänen annoskertymänsä lähes-
tyy asetettua ylärajaa. Työntekijöiden vaihtaminen saattaa kuitenkin kasvattaa kollektiiviannosta, minkä takia voi olla tarkoituksenmukaista jatkaa töitä samalla miehityksellä vaikka henkilöannosten tavoitetaso ylittyisikin.

Vuosiannoksen yläraja on A-luokan säteilytyöntekijällä 50 mSv kuitenkin siten, ettei viiden vuoden aikana saatu kokonaisannos ylitä 100 mSv:iä. Tulevaisuudessa annosrajaa tullaan selkeyttämään siten, että vuosiannoksen pysyväksi ylärajaksi tulee 20 mSv:iä [5]. Suomalaisilla voimalaitoksilla ei ole ylitetty 50 mSv:n rajaa kertaakaan. Olkiluodon laitoksella on yli 20 mSv:n vuosiannoksia kirjattu neljä kappaletta, kolme vuonna 1989 ja yksi vuonna 1994. Vuoden 2006 jälkeen kaikki Olkiluodon vuosiannokset ovat olleet alle 10 mSv:n suuruisia.

Loviisan laitoksella työntekijät saavat suurempia henkilöannoksia kuin Olkiluodossa. Kahdenkymmenen millisievertin ylittäviä annoksia on kirjattu 22 kertaa, viimeksi vuonna 1996, jolloin mitattiin suurin suomalaisilla ydinvoimaloilla mitattu vuosiannos, 27,25 mSv. Vuonna 1997 Loviisan laitoksella siirryttiin vuosihuoltorytmytykseen, missä paritominana vuosina toteutettiin vain polttoainenvaihtoseisokit kummallakin yksiköllä. Tä-



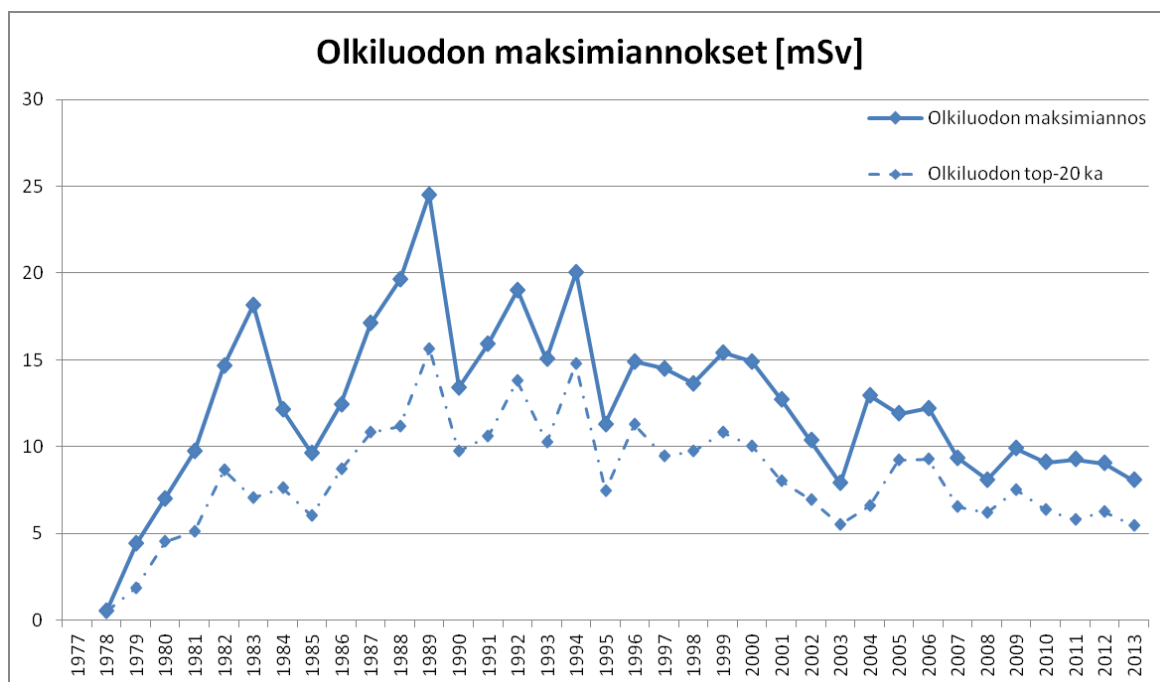
Kuva 8: Loviisan voimalaitoksen kollektiiviannokset, kahden ja neljän vuoden liukuvat keskiarvot sekä viitteelliset regressiosuorat

mä näkyy myös maksimiannosten kehityksessä. Vuonna 1997 maksimiannos on vielä samalla tasolla parillisten vuosien kanssa, mutta kahdenkymmenen suurimman annoksen keskiarvo on edellistä ja seuraavaa vuotta pienempi (Kuva 10 Taulukko 6). Vuodesta 2001 alkaen vuosihuoltorytmitys näkyy selvästi sekä maksimiannoksissa että 20 suurimman annoksen keskiarvossa.

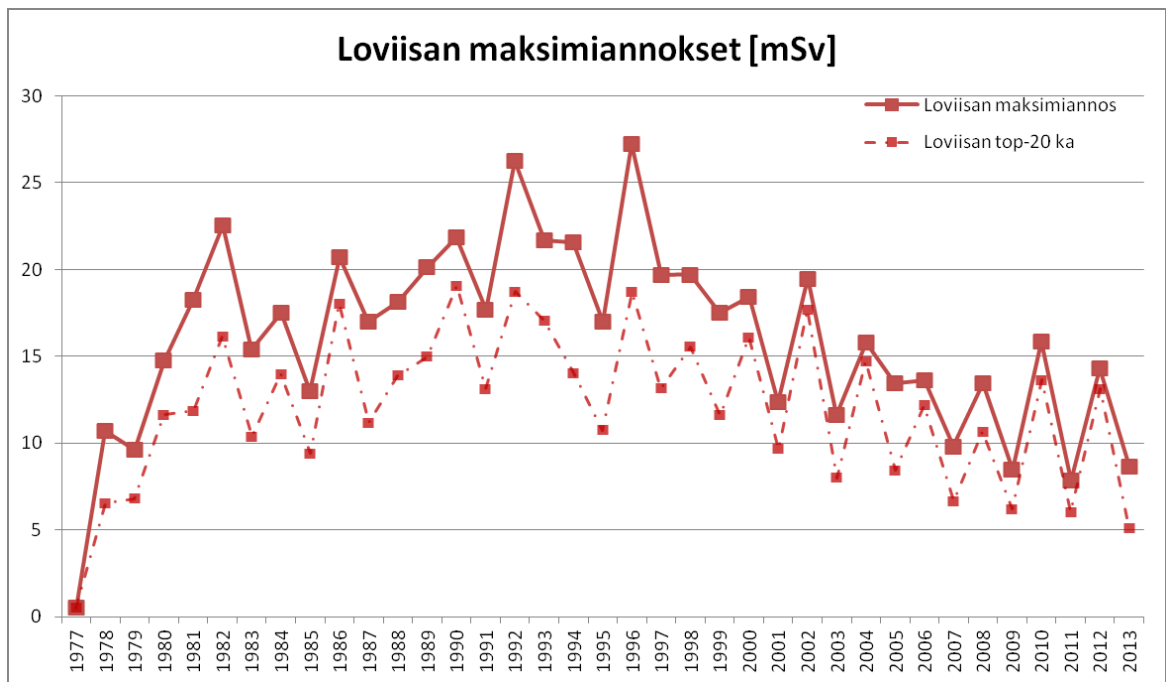
5.1.2 Kahdenkymmenen eniten altistuneen työntekijän annos

Yksittäisen työntekijän suuri säteilyannos ei välttämättä kuvaa hyvin laitoksen yleistä annoskertymää. Poikkeukselliset työolot, vajaa miehitys tai ennalta arvaamattomat huoltotyöt voivat kasvattaa yksittäisen työntekijän säteilyannoksen poikkeuksellisen suureksi. Toisaalta myöskään pelkkä kollektiiviannos ei kerro koko totuutta säteilysuojelun onnistumisesta, sillä sen suuruuteen vaikuttaa erityisesti vuosihuollon laajuus. Suuri määrä pieniä säteilyannoksia voi johtaa suureen kollektiiviannokseen tilanteessa, jossa säteilysuojelu on onnistunut hyvin mutta huoltotöitä ja työntekijöitä on paljon. Tarkastelemalla sopivaa määrää suurimpia säteilyannoksia voidaan saada käsitys siitä, ovatko suuret, lähellä maksimia olevat säteilyannokset yleisiä vai poikkeustapauksia.

Kuva 9) ja (Kuva 10) on kuvattu suurimmat vuotuiset säteilyannokset ja kahdenkymmenen suurimman säteilyannoksen keskiarvo laitoksittain. Loviisan maksimiannosten kuvaajassa näkyy varsinkin viime vuosikymmenen aikana vuosihuoltorytmityksen vaikutus. Kahdenkymmenen suurimman annoksen keskiarvossa tämä ilmiö näkyy vieläkin selvemmin. Viimeisen vuosikymmenen aikana suurin henkilökohtainen säteilyannos on pysynyt kahta vuotta lukuun ottamatta alle 15 mSv:ssä. Kahdenkymmenen suurimman annoksen keskiarvo on ollut varsin lähellä suurinta annosta viime vuosina. Useat työntekijät ovat siis saaneet lähellä tavoitearvoa olevia annoksia. Suurimmat annokset ovat tällä aikavälillä tulleet lähes yksinomaan eristystöistä, siivouksesta ja mekaanisesta kunnossapidosta. Materiaalitarkastajia ja kiinteistöihin osallistuneita esiintyy kahdenkymmenen eniten altistuneen joukossa toisinaan (Taulukko 6).



Kuva 9: Olkiluodon voimalaitoksen eniten altistuneen henkilön vuosiannos sekä kahdenkymmenen suurimman henkilöannoksen keskiarvo



Kuva 10: Loviisan voimalaitoksen eniten altistuneen henkilön vuosiannos sekä kahdenkymmenen suurimman henkilöannoksen keskiarvo

Olkiluodon voimalaitoksella työntekijät ovat saaneet pienempiä säteilyannoksia kuin Loviisan laitoksella. Suurimmat vuotuisen säteilyannoksen ja kahdenkymmenen suurimman annoksen keskiarvon välillä on myös suurempi ero kuin Loviisassa. Maksimiannokset ovat laskeneet yhdeksänkymmentäluvun alusta lähtien, samoin kuin kollektiiviannoksetkin (Kuva 7). Vuoden 1989 suuret huoltotyöt sekä vuosien 2005 ja 2006 laajat työt turbiinirakennuksessa erottuvat kuvaajasta kuten kollektiiviannosten kuvaajastakin. Vuoden 1999 poikkeuksellisen pieni kollektiiviannos johtuu molemmilla laitoksilla toteutetusta lyhyestä polttoaineenvaihtoseisokista. Vuonna 2000 molemmilla laitosyksiköillä oli huoltoseisokki ja vuodesta 2001 lähtien vuosihuollot on porrastettu niin, että yhdellä laitosyksiköllä toteutetaan polttoaineenvaihtoseisokki ja toisella huoltoseisokki [50], [51].

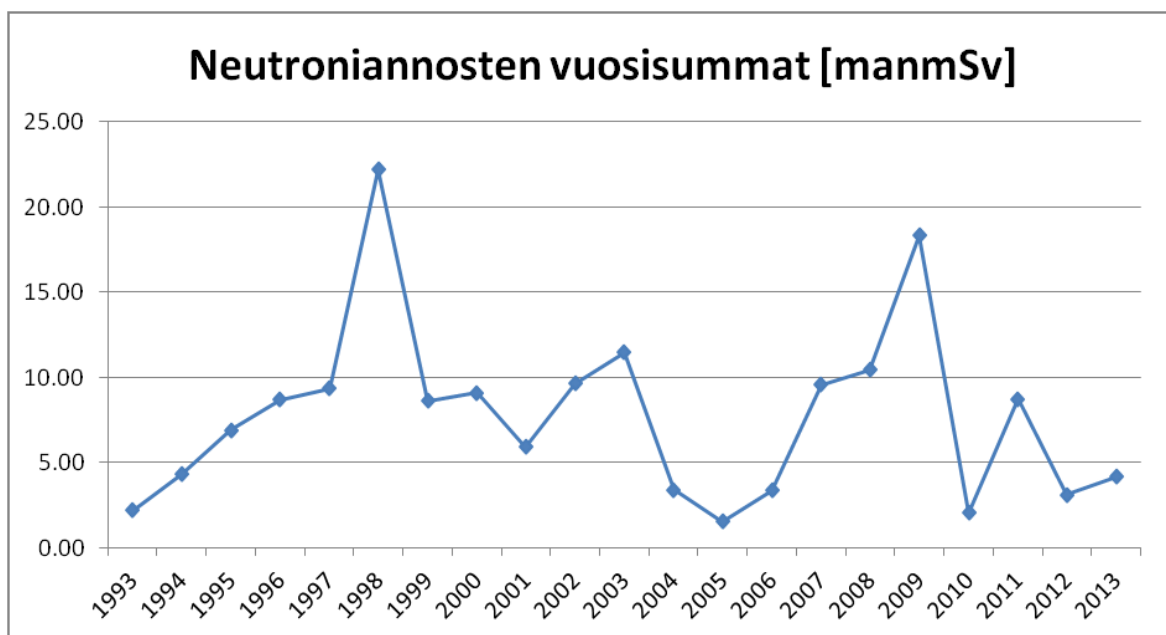
TVO:n tavoitteena on pitää kollektiiviannokset alle 1,0 henkilösievertissä vuosina, jolloin ei tehdä poikkeuksellisen suuria huoltotöitä. Lisäksi tavoitteena on suurimman henkilökohtaisen annoksen pitäminen alle 10 mSv:ssä [20]. Tämä tavoite on toteutunut vuoden 2006 jälkeen kaikkina vuosina.

5.1.3 Neutroniannokset

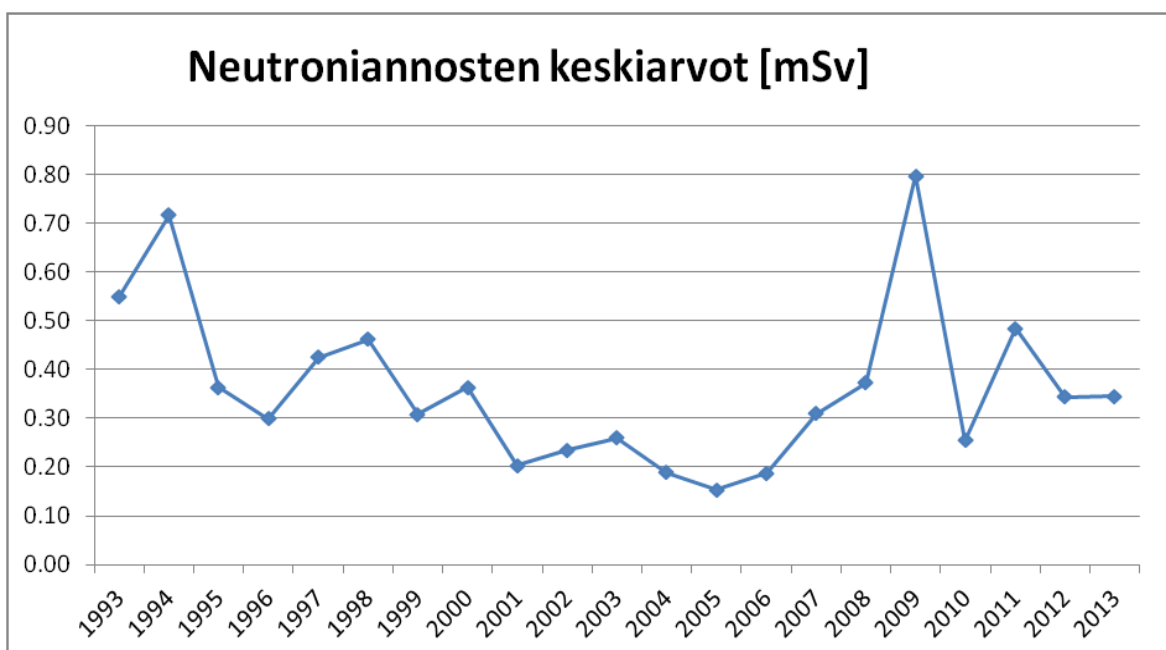
Neutronisäteilystä aiheutuneita henkilöannoksia on Suomessa mitattu vain Loviisan voimalaitoksella. Neutronisäteilyn lähteitä ovat reaktorien lisäksi käytetty polttoaine. Olkiluodon laitoksilla reaktorin suojarakennus on suljettu ja luoksepääsemätön tila käytön aikana. Loviisan laitoksella taas pääkiertopumppujen tarkastus- tai huoltotöistä voi aiheutua neutroniannosta työntekijöille, sillä neutronisäteilyä kulkeutuu pääkiertoputkia pitkin reaktorista pumppukuoppiin. Neutronisäteilyn annosnopeuden suuruus vaihtelee huomattavasti pumppukuopan sisällä. Säteily on voimakkaimmillaan kuopan pohjalla ja pumpulta reaktoriin kulkevan kylmän haaran pääkiertoputken suunnassa.

Neutroniannoksia kirjataan vuosittain noin kymmenestä noin neljään kymmeneen. Suurin määrä kirjauskynnyksen ylittäneitä neutroniannoksia kirjattiin vuonna 1998, 49 kappaletta. Neutroniannokset ovat keskimäärin olleet pieniä verrattuna gammasäteilyn aiheuttamiin annoksiin. Vuonna 2009 Loviisa 2:n pääkiertopumpun YD12 öljyvuodon korjaustöistä kertyi poikkeuksellisen paljon neutroniannosta, 12,44 manmSv neljän päivän aikana [52], [53]. Tällöin kaksi asentajaa sai poikkeuksellisen suuret henkilöannokset, 4,3 ja 3,3 mSv. Yli kolmen millisievertin neutroniannos on rekisteröity vain kerran aikaisemmin, vuonna 1998.

Kirjauskynnyksen 0,1 mSv ylittäviä kuukausittaisia neutroniannoksia on kirjattu annosrekisteriin 725 kappaletta, kun kaikkia annoksia on kirjattu ydinvoimalaitoksilta yli puoli miljoonaa [15]. Kirjauskynnyksen ylittävien neutroniannosten keskiarvo on 0,238 mSv mediaanin ollessa 0,14 mSv. Yli yhden millisievertin kuukausittaisia neutroniannoksia on raportoitu Suomessa 11 kappaletta [15].



Kuva 11: Suomalaisilla ydinvoimaloilla saadut neutroniannokset vuodessa



Kuva 12: Kirjauskynnyksen (0,1 mSv) ylittäneiden neutroniannosten keskiarvot

5.2 Työntekijäryhmäkohtaiset annokset

Kansalliseen annosrekisteriin kirjataan kaikkien Suomessa työskentelevien säteilytyöntekijöiden saamat työannokset. Tietokantaan kirjataan samalla työntekijän työnantaja sekä ammattiryhmäkoodi. Tästä syystä rekisteristä voidaan tarkastella myös ammattiryhmäkohtaista annoskertymää. Ammattiryhmäkoodeja on käytetty kattavasti vuodesta 1990 lähtien; aiempina vuosina merkinnät ovat puutteellisia. Olkiluodon laitoksella ammattiryhmäkoodit otettiin kunnolla käyttöön vuonna 1990, sitä ennen suurin osa työntekijöiden annoksista kirjattiin ilman ammattiryhmäkoodia. Loviisan laitoksella ammattiryhmät on kirjattu varsin kattavasti vuodesta 1982 alkaen. Vuonna 1989 38 % annostiedoista kirjattiin kuitenkin ilman ammattiryhmäkoodia. Koska yhtenäiset ja kattavat merkinnät molemmilla laitoksilla alkavat vuodesta 1990, on tässä työssä tarkasteltu aineistoa siitä alkaen ellei toisin ole mainittu.

Taulukko 4: Valtakunnallisessa annosrekisterissä käytetyt ammattikoodit

koodi	selite	muuta
AI	YV aineenkoestus	vuodesta 2009 alkaen MT - Materiaalitarkastus
AU	YV Sähkö- ja automaatiotyöt	käytössä vuodesta 2009 alkaen
ER	YV eristetyö	
IN	YV Instrumentointityö	vuodesta 2009 alkaen AU - YV Sähkö- ja automaatiotyöt
JD	YV jätteiden käsittely, dekontaminointi	
KN	YV kiinteistötyöt	
KÄ	YV käyttöhenkilöstö	
LB	YV Laboratoriotyöt	käytössä vuodesta 2009 alkaen
ME	YV mekaaniset ja konekunnossapitotyöt	
MT	Materiaalitarkastus	käytössä vuodesta 2009 alkaen
MY	YV muut työt	
PA	YV polttoaineen käsittely	
SS	YV sähkötyöt	vuodesta 2009 alkaen AU - YV Sähkö- ja automaatiotyöt
SV	YV siivous	
SÄ	YV säteilysuojeluhenkilöstö	
TH	YV telinetyöt ja haalaus	

Ydinvoimalaitoksilla käytettyjä ammattikoodeja on yhteensä neljätoista kappaletta. Ammattikoodi ei siis kerro tarkkaa työtehtävää, esimerkiksi koodi *ME – YV mekaaniset ja konekunnossapitotyöt* pitää sisällään paljon erilaisia töitä hitsauksesta pumppujen kunnossapitoon. Ammattiryhmien annosten tarkastelulla voidaan kuitenkin saada lisätietoa esimerkiksi siitä, minkä ryhmän säteilysuojelukoulutukseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota.

Taulukossa (Taulukko 4) on esitelty annosrekisterissä käytetyt ammattiryhmät ja niitä vastaavat koodit. Vuoden 2009 alusta lähtien koodi *AI – YV aineenkoestus* on poistunut käytöstä. Tämän tilalla on siirrytty käyttämään koodia *MT – materiaalitarkastus*, joka on käytössä myös muualla teollisuudessa. Samalla koodit *IN – YV instrumentointityö* ja *SS – YV sähkötyöt* yhdistettiin. Uusi koodi on *AU – YV sähkö- ja automaatiotyöt*.

Taulukko 5: Ammattiryhmäkohtaiset keskiarvot vuosilta 1990 - 2013

			Henkilö- annos [mSv]	Annoksen muutos vuodessa [manmSv/v]	Työntekijöi- den lkm.	Kollektiivian- nos [manmSv]
ER	<i>YV eristetyö</i>	Olkiluoto	3.32	-0.098	45.1	149.78
		Loviisa	7.75	-0.157	23.4	181.26
IN	<i>YV Instrumentointityö*</i>	Olkiluoto	0.69	-0.009	53.2	36.88
		Loviisa	1.25	0.035	39.3	49.16
JD	<i>YV jätteiden käs., dekont.</i>	Olkiluoto	1.72	0.032	11.5	20.63
		Loviisa	3.45	-0.173	11.8	40.56
KN	<i>YV kiinteistötyöt</i>	Olkiluoto	0.60	-0.005	62.4	37.55
		Loviisa	1.67	-0.023	21.2	35.51
KÄ	<i>YV käyttö</i>	Olkiluoto	0.86	-0.005	82.5	71.14
		Loviisa	0.72	0.008	44.0	31.88
LB	<i>YV Laboratoriotyöt</i>	Olkiluoto				
		Loviisa	0.79	0.135	19.4	15.37
ME	<i>YV mekaaniset ja konekunn.</i>	Olkiluoto	1.49	-0.040	405.4	604.01
		Loviisa	2.82	-0.092	194.7	548.61
MT	<i>Materiaalitarkastus</i>	Olkiluoto	1.32	-0.035	122.3	161.23
		Loviisa	2.17	-0.074	89.7	194.90
PA	<i>YV polttoainetyöt</i>	Olkiluoto	0.52	-0.027	24.0	12.50
		Loviisa	1.16	-0.066	12.5	14.41
SS	<i>YV sähkötyöt sis. sähkö- ja aut. -koodin</i>	Olkiluoto	0.60	0.012	112.0	66.95
		Loviisa	1.51	-0.032	52.6	79.30
SV	<i>YV siivous</i>	Olkiluoto	1.40	-0.013	102.0	142.66
		Loviisa	5.45	-0.138	47.0	256.17
SÄ	<i>YV säteilysuojeluhenkilöstö</i>	Olkiluoto	1.60	-0.035	41.9	66.82
		Loviisa	4.22	-0.175	32.3	136.13
TH	<i>YV telinetyöt ja haalaus</i>	Olkiluoto	1.42	-0.025	25.3	35.90
		Loviisa	1.55	-0.009	41.8	64.95
YV	<i>YV muut työt</i>	Olkiluoto	0.44	-0.003	70.1	30.83
		Loviisa	0.70	-0.023	62.0	43.64

* Käytössä Loviisassa vuoteen 2008 ja Olkiluodossa vuoteen 2010

Ammattiryhmien osuuksissa kokonaissäteilyannoksesta on tapahtunut jonkin verran muutoksia. Neljän eniten altistuvan ammattiryhmän (mekaaninen ja konekunnossapito, materiaalitarkastus, eristetyöt ja siivous) osuus Olkiluodossa kertyvästä kollektiiviannoksesta on pienentynyt. Vuonna 1990 nämä neljä ammattiryhmää saivat 84 % Olkiluodon kollektiiviannoksesta. Vuonna 2013 näiden ryhmien yhteenlaskettu säteilyannos oli enää 66 % kollektiiviannoksesta (Kuvat 16, 17 ja 18). Loviisassa nähdään samanlainen muutos kolmen suurimman ammattiryhmän osalta (mekaaninen ja konekunnossapito, siivous ja materiaalitarkastus). Näiden ammattiryhmien yhteenlaskettu osuus on pudonnut 66 prosentista 55 prosenttiin, kun tarkastellaan kahden vuoden liukuvaa keskiarvoa välillä 1991 – 2013 (Kuvat 13, 14 ja 15). Neljänneksi eniten altistuvan ammattiryhmän eli eristäjien osuus on sen sijaan kasvanut tarkastelujaksolla kuudesta kolmeen toista prosenttiin. Kahden vuoden keskiarvoistus on Loviisan voimalaitoksen tapauksessa hyödyllistä, sillä parittomina ja parillisina vuosina suoritettavissa seisokeissa – ja si-

ten kertyneessä säteilyannoksessa – on merkittävä ero. Parittomina vuosina on suoritettu lyhyet polttoaineenvaihtoseisokit, parillisina vuosina laajemmat huoltoseisokit.

5.2.1 Eristetyöt

Valtaosa ydinvoimalaitoksen laitoskomponenteista ja putkista on päällystetty paksulla lämpöeristeellä lämpöhävikin minimoimiseksi. Huoltotöitä ja tarkastuksia varten eristykset on purettava ja töiden jälkeen on eristeet asetettava takaisin paikoilleen. Tämä vaatii työskentelyä lähellä säteileviä komponentteja kuten primääripiirin putkia ja lämmönvaihtimia, minkä takia eristetöiden tekijät saavat usein merkittäviä säteilyannoksia. Sinä aikana, kun voimalaitostyöntekijöiden annostietoihin on kirjattu työntekijäryhmä, eristetyöntekijät ovat saaneet molemmilla laitoksilla 10 % kaikesta säteilyaltistuksesta (Taulukko 5), kun eristetyöntekijöitä on ollut molemmilla laitospaikoilla alle 4 % kaikista työntekijöistä.

Eristetyöntekijöiden saama säteilyannos keskittyy varsin pienelle työntekijämäärälle, joten he saavat suuria henkilökohtaisia annoksia. Ammattiryhmään kuuluvien työntekijöiden keskimääräisellä säteilyannoksella mitattuna eristetöiden tekijät saavat suurimmat työannokset (Taulukko 5), mutta kollektiiviannoksilla mitattuna he saavat Olkiluodossa kolmanneksi ja Loviisassa neljänneksi eniten säteilyä. Loviisan voimalaitoksella eristetyöntekijät ovat useimmiten esiintyvä ammattiryhmä kahdenkymmenen suurimman säteilyannoksen saaneiden joukossa (Taulukko 6). Olkiluodossa eristäjät ovat toiseksi yleisin ammattiryhmä kahdenkymmenen suurimman annoksen joukossa, suurin esiintyvyys kahdenkymmenen suurimman annoksen joukossa on mekaanisissa ja konekunnossapitotöissä työskentelevillä. Vuodesta 1990 lähtien eristetöissä työskentelevien vuosiannokset ovat olleet 3.32 mSv Olkiluodossa ja 7.75 mSv Loviisassa. Tänä aikana vuosiannokset ovat pienentyneet Loviisassa keskimäärin 0.16 mSv/v ja Olkiluodossa 0.1 mSv/v (Kuva 19).

Taulukko 6: Ammattiryhmien esiintyminen kahdenkymmenen suurimman henkilöannoksen joukossa vuosina 1990 – 2013

	Olkiluoto	Loviisa	Yhteensä
ME YV mekaaniset ja konekunnossapitotyöt	231	106	337
ER YV eristetyö	114	161	275
SV YV siivous	46	138	184
MT Materiaalitarkastus	54	17	71
SÄ YV säteilysuojeluhenkilöstö	11	22	33
JD YV jätteiden käsittely, dekontaminointi	7	8	15
IN YV Instrumentointityö	0	11	11
KN YV kiinteistötyöt	0	10	10
PA YV polttoainetyöt	5	0	5
SS YV sähkötyöt	2	3	5
YV YV muut työt	4	0	4
KÄ YV käyttö	3	0	3
AU YV Sähkö- ja automaatiotyöt	0	2	2
TH YV telinetyöt ja haalaus	1	1	2
LB YV Laboratoriotyöt	0	1	1

5.2.2 Siivous

Siivous vuosihuollon aikana on varsin suuri työkokonaisuus. On useita syitä, miksi siivousta tehdään jatkuvasti ja perusteellisesti vuosihuoltojen aikana. Mahdollisen pintakontaminaation leviämisen estämiseksi ja poistamiseksi tilojen on oltava niin puhtaita kuin töiden eteneminen sallii. Sama pätee palokuorman minimoimiseen, kaikki materiaali, jota ei enää tarvita työkohteella, on poistettava mahdollisimman nopeasti jotta tulipaloriski saadaan minimoitua. Ylimääräisen materiaalin poistaminen ajallaan työkohteilta on tärkeää myös siksi, että vuosihuoltojen aikana on samanaikaisesti käynnissä jopa satoja eri huoltotöitä ahtaissa tiloissa. Huoltotöiden valmistuttua voimalaitos halutaan saada mahdollisimman nopeasti tuotantokäyttöön, joten siivousta ei voida jättää tehtäväksi muiden töiden jälkeen. Kaikki tämä tarkoittaa sitä, että siivoojat liikkuvat laitoksella paljon myös tiloissa, joissa on säteileviä komponentteja. Laitossiivoojat saavatkin huomattavia henkilökohtaisia annoksia. Siivoojat ovat Loviisassa toiseksi ja Olkiluodossa neljänneksi useimmiten esiintyvä ammattiryhmä kahdenkymmenen suurimman henkilöannoksen saaneiden joukossa.

Myös siivoojien ammattiryhmän työntekijöiden säteilyannokset ovat Loviisassa keskimäärin suurempia kuin Olkiluodossa. Varsinkin vuonna 2002 Loviisan säteilyannokset olivat tällä ammattiryhmällä suuria. Toisaalta Loviisan siivoojien keskimääräiset annokset ovat pienentyneet tarkastelujakson aikana 0,138 millisievertiä vuodessa, mikä on neljänneksi suurin vähenemisvauhti (Kuva 20).

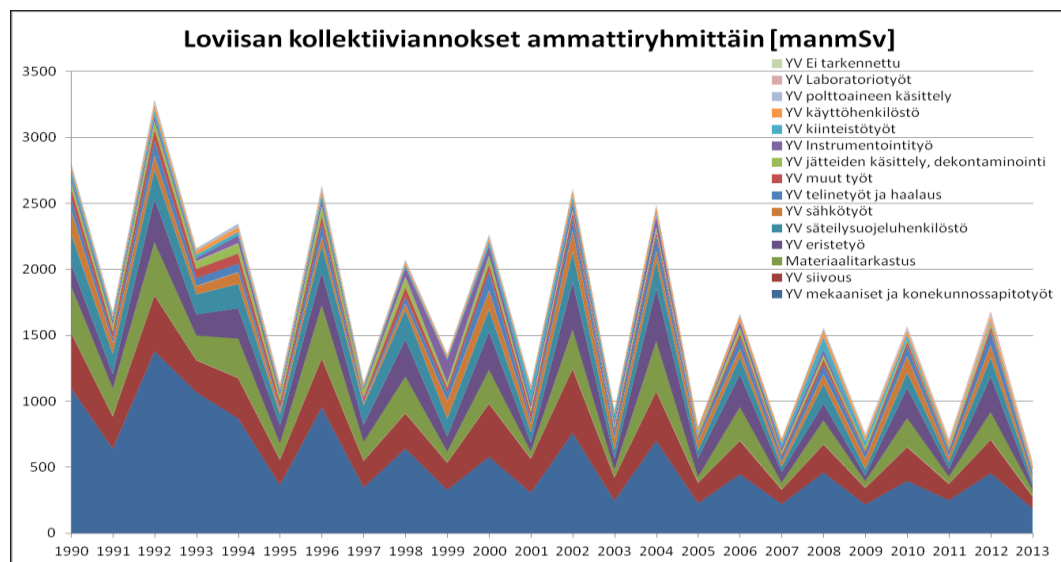
5.2.3 Säteilysuojelu

Huoltotöiden aikana säteilysuojelu on jatkuvaa työolojen ja -varusteiden tarkastamista. Säteilysuojelutyöhön kuuluu lisäksi töiden valvontaa, opastusta, koulutusta sekä säteilysuojien asentamista työkohteille. Työnsä puolesta säteilysuojelussa työskentelevät liikkuvat paikoissa, joissa on vähintään mahdollisuus säteilyaltistukseen. Säteilyvalvojat saavat molemmilla laitoksilla kolmanneksi suurimpia henkilöannoksia. Kollektiiviannoksella mitattuna he ovat ammattiryhmien keskitasoa johtuen pienestä henkilömäärästä muihin ammattiryhmiin verrattuna. Loviisan laitoksella säteilyaltistus on ollut suurempaa kuin Olkiluodon laitoksella, tosin henkilöannosten pieneneminen on myös ollut voimakkaampaa Loviisassa (Kuva 21).

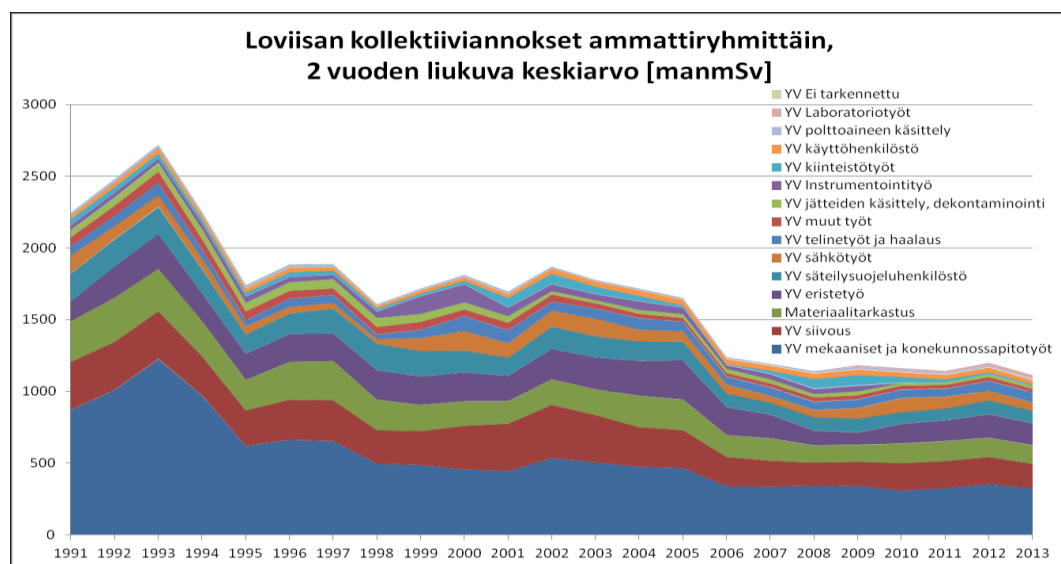
Osa säteilyvalvontatöistä on Olkiluodon voimalaitoksella ulkoistettu töiden kausiluontoisuuden takia. Loviisan voimalaitoksella työskentelevät säteilyvalvojat ovat tyypillisesti Fortumin omia työntekijöitä. Töihin palkataan erityisesti energia-alan opiskelijoita, ja heille annetaan koulutus töihin ennen työjakson alkua.

5.2.4 Jätteiden käsittely ja dekontaminaatio

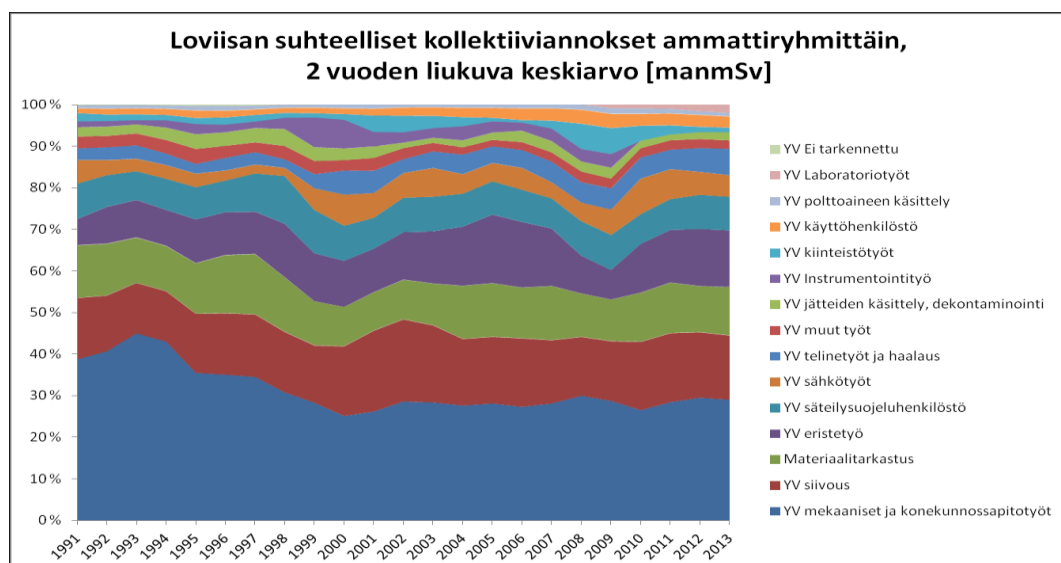
Jätteiden käsittely ydinvoimalaitoksella perustuu huolelliseen lajitteluun. Kaikki valvonta-alueella käsiteltävä materiaali tarkastetaan ennen kuin se joko vapautetaan valvonnasta ja toimitetaan normaalin jätehuollon kautta kierrätettäväksi tai kaatopaikalle tai se luokitellaan matala- tai keskiaktiiviseksi jätteeksi ja toimitetaan ydinvoimalan omaan jätehuoltojärjestelmään. Huoltotöissä syntynyt jäte kuten suojavarusteet ja likaantuneet suojamuovit pakataan tynnyreihin ja haudataan matala-aktiivisten jätteiden varastoluolaan. Keskiaktiivinen jäte on pääasiassa voimalaitoksen prosessivesien puhdistukseen käytettyjä ioninvaihtohartsia sekä nestemäisiä jätteitä. Nämä kiinteytetään bitumiin tai betoniin ja toimitetaan keskiaktiivisen jätteen varastoluolaan. Erityisesti käytetty ioninvaihtohartsit ovat hyvin radioaktiivisia ja niiden käsittely vaatii erikoistyökaluja ja -osaamista.



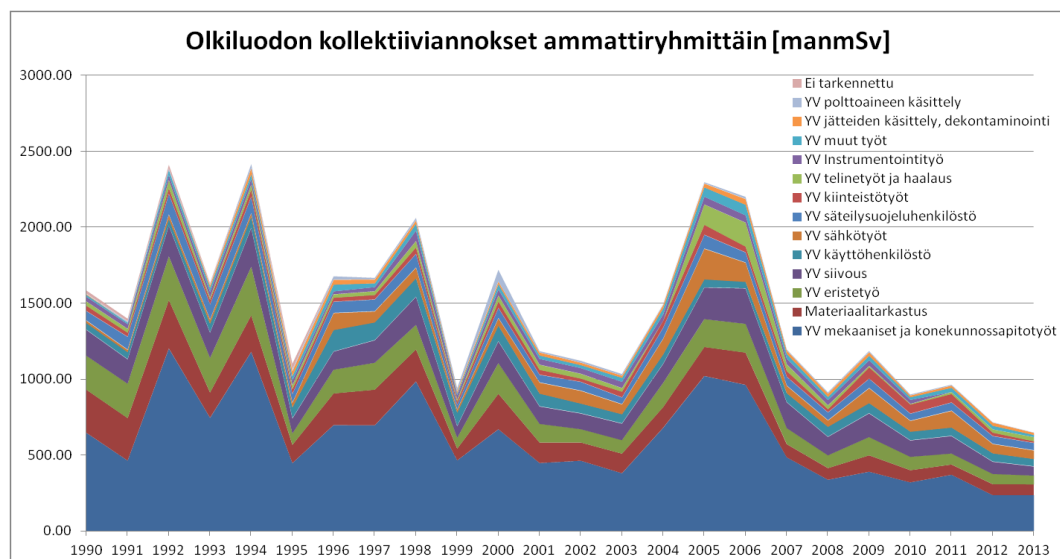
Kuva 13: Loviisan voimalaitoksen kollektiiviannokset ammattiryhmittäin



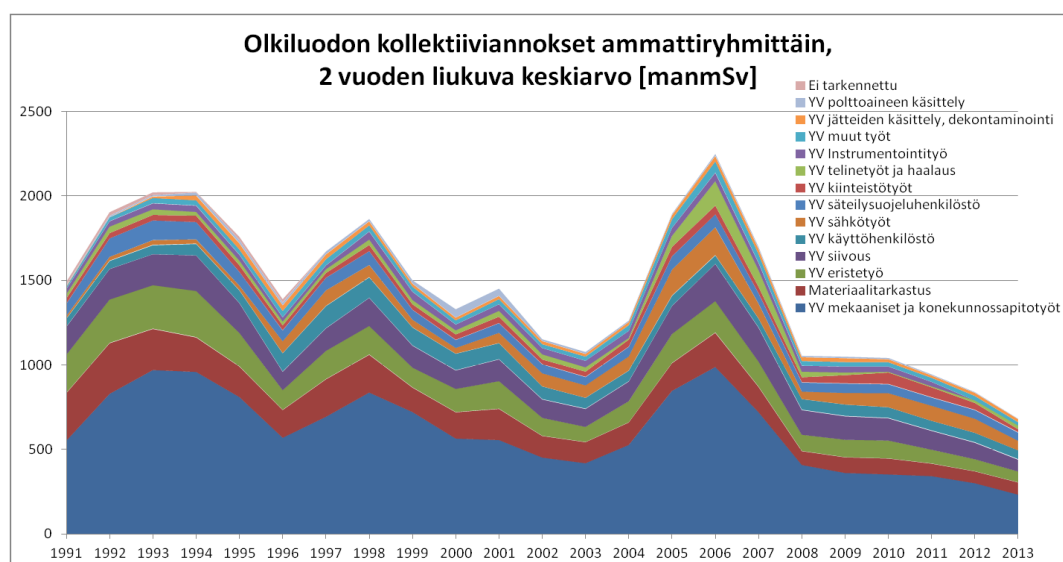
Kuva 14: Loviisan voimalaitoksen kollektiiviannosten kahden vuoden liukuvat keskiarvot ammattiryhmittäin



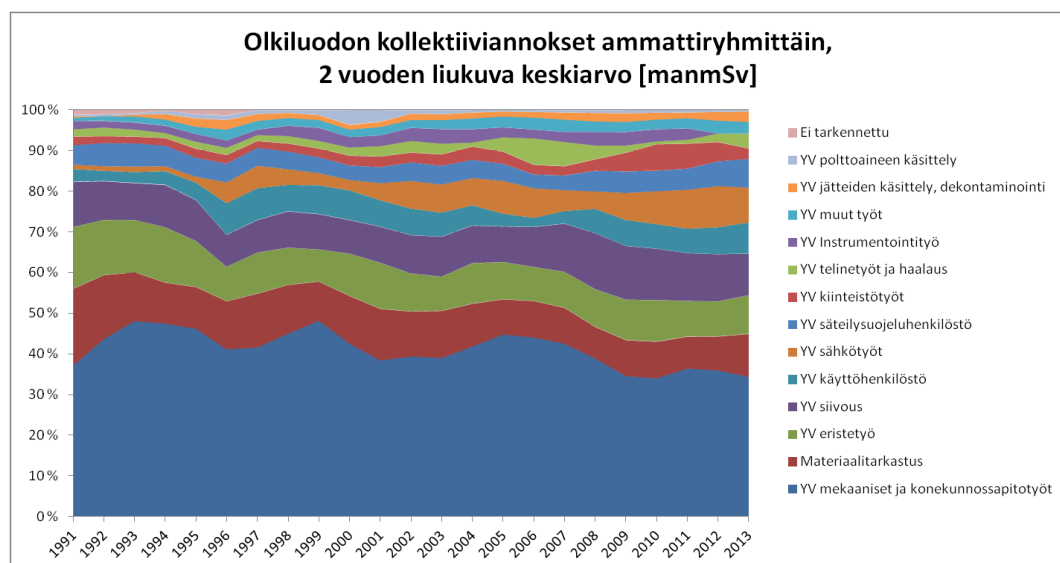
Kuva 15: Ammattiryhmien suhteelliset kollektiiviannokset Loviisan voimalaitoksella, kahden vuoden liukuvat keskiarvot



Kuva 16: Olkiluodon voimalaitoksen kollektiiviannokset ammattiryhmittäin



Kuva 17: Olkiluodon voimalaitoksen kollektiiviannosten kahden vuoden liukuvat keskiarvot ammattiryhmittäin



Kuva 18: Ammattiryhmien suhteelliset kollektiiviannokset Olkiluodon voimalaitoksella, kahden vuoden liukuvat keskiarvot

Dekontaminoinnilla pyritään pienentämään radioaktiivisen lian leviämistä ja laitoksen kontaminaatiota sekä pienentämään komponenttien huoltotöihin osallistuvien saamaa säteilyannosta. Esimerkiksi Olkiluodon voimalaitoksen pääkiertopumppujen juoksupyörät ja akselit dekontaminoidaan ennen huoltoa ja tasapainotusta. Dekontaminoinnissa saavutetaan tyypillisesti dekontaminointikerroin 5 – 6, eli annosnopeus pienenee alle viidesosaan alkuperäisestä. Juoksupyörän ja akselin puhdistus, tarkastus ja huolto aiheuttavat yhteensä noin 2 – 3 manmSv säteilyannoksen. Dekontaminaation osuus tästä on noin 0,5 – 1 manmSv [54].

Jätteiden käsittelystä ja dekontaminaatiotyöstä kertyy siihen osallistuville verraten korkeita henkilöannoksia (Kuva 22). Varsinkin 1990-luvun aikana Loviisan voimalaitoksella esiintyi korkeita henkilöannoksia tässä ammattiryhmässä. Ammattiryhmä on molemmilla laitoksilla lukumäärältään pienin, keskimäärin alle kahdentoista henkilön vahvuinen. Tästä johtuen jätehuolto- ja dekontaminaatiotyöstä kertynyt kollektiiviannos on verraten pieni.

5.2.5 Mekaaninen kunnossapito

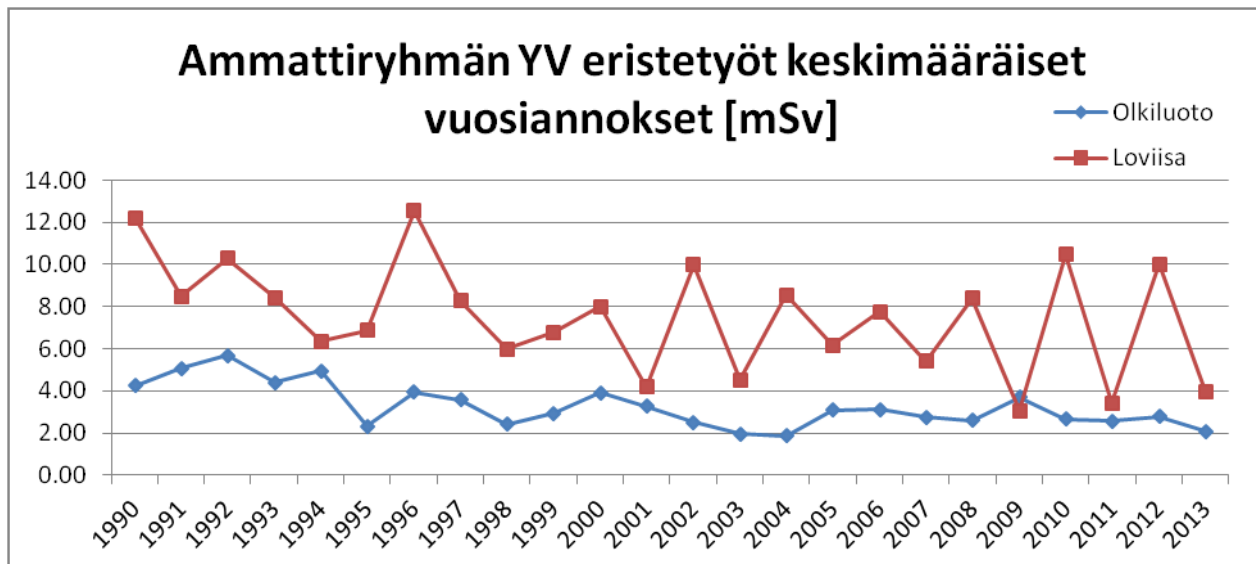
Mekaaninen ja konekunnossapito on suurin yksittäinen ammattiryhmä, joka osallistuu laitosten ylläpitoon. Tämä ammattiryhmäkoodi pitää sisällään paljon erilaisia töitä, muun muassa hitsausta, koneistusta, asennusta ja mittauksien tekemistä. Loviisassa mekaanisiin kunnossapitotöihin on osallistunut yli kaksi kertaa enemmän työntekijöitä kuin toiseksi suurimpaan ammattiryhmään materiaalitarkastajiin. Olkiluodossa ero on vielä suurempi, konekunnossapitotyöt ovat työllistäneet yli kolme kertaa niin paljon väkeä kuin materiaalitarkastukset, mikä on toiseksi yleisimmin edustettu ammattiryhmä.

Työntekijöiden suuren lukumäärän takia tämän ammattiryhmän kollektiiviset annokset ovat suurimmat, mutta keskimääräinen henkilökohtainen annos on ammattiryhmien keskitasoa. Olkiluodossa keskimääräinen henkilökohtainen annos on vuosien 2005 ja 2006 suurten huoltotöiden jälkeen vakiintunut noin yhden millisievertin tasolle, kun Loviisassa annos on noin kaksinkertainen (Kuva 23). Olkiluodossa tähän ammattiryhmään kuuluu noin kaksi kertaa niin paljon työntekijöitä kuin Loviisassa. Loviisan laitoksella vuosihuoltorytmitys näkyy myös tässä ammattiryhmässä sekä työntekijöiden määrässä että säteilyannosten suuruudessa.

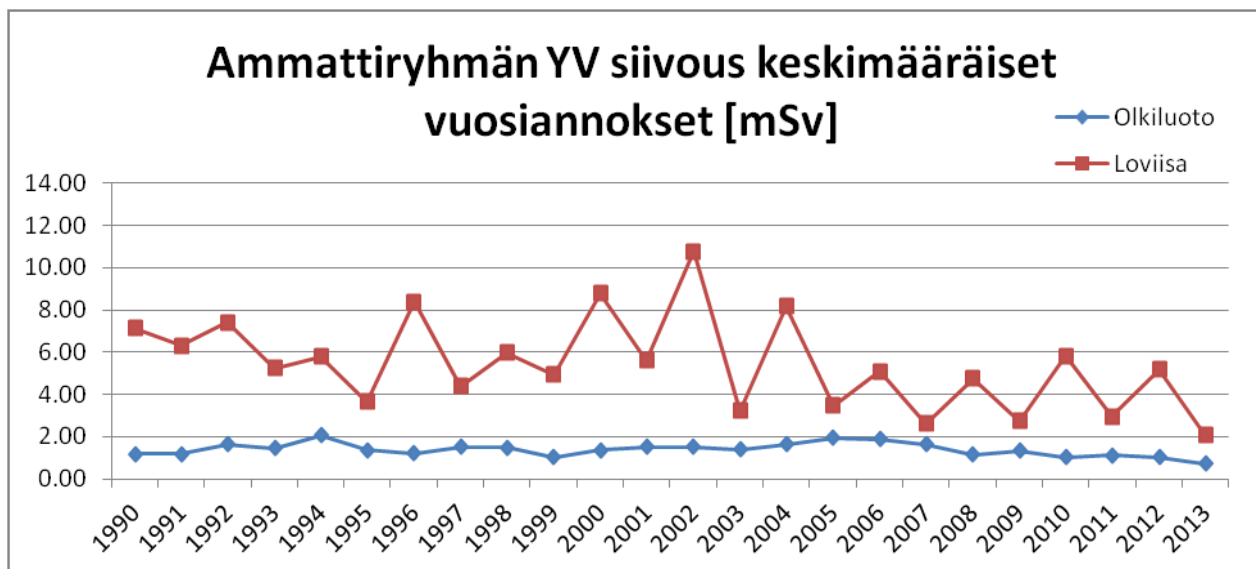
5.2.6 Materiaalitarkastukset

Onnettomuuksien estämiseksi ja vakavien onnettomuuksien seurausten pienentämiseksi ydinvoimalaitosten järjestelmiltä edellytetään hyvää rakenteellista lujuutta niiden koko käyttöajan ajan. Tämän varmistamiseksi voimalaitoskomponenteille on määritetty määräaikaistarkastusohjelma. Tarkastusohjelma on perinteisesti pohjautunut komponenttien turvallisuusluokitukseen. Viime vuosina on otettu käyttöön todennäköisyysperusteiseen riskianalyysiin pohjautuvia tarkastusohjelmia (kts. luku 6.4). Tämä tulee vaikuttamaan tarkastettavien kohteiden sijaintiin ja lukumäärään, mutta itse tarkastusmenetelmät säilyvät ennallaan.

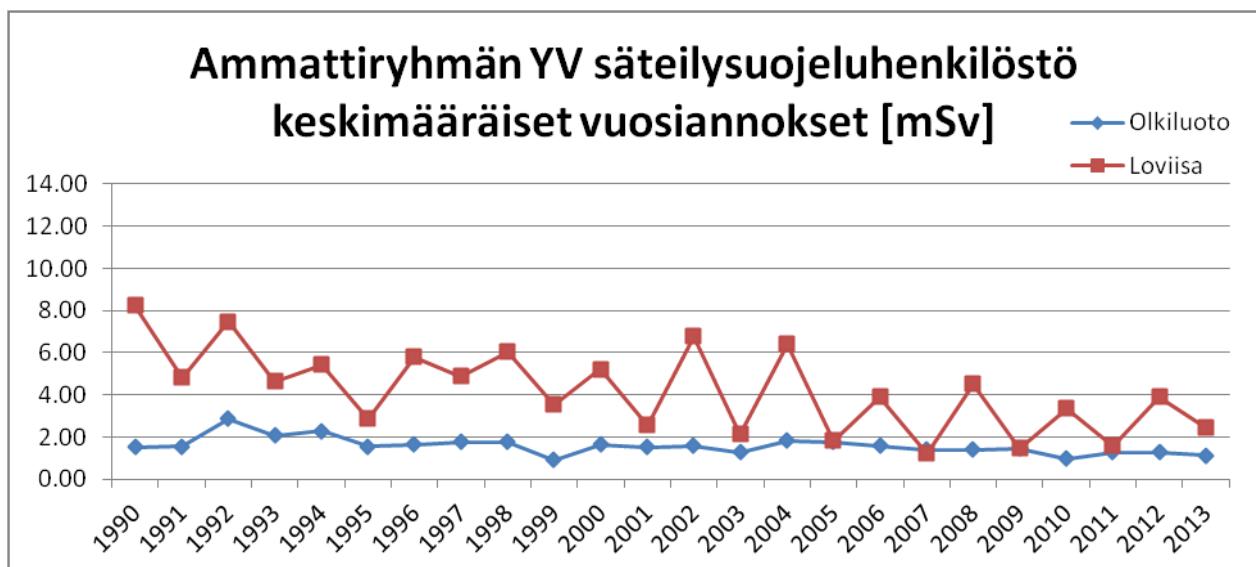
Määräaikaistarkastuksia suoritetaan usealla eri tekniikalla. Pintatarkastuksia suoritetaan visuaalisesti sekä tunkeumaneste-, pyörrevirta ja magneettijauhemenetelmällä. Volymetriset eli tarkastettavan kohteen sisällä olevien poikkeamien löytämiseen tarkoitettut tarkastukset suoritetaan ultraäänitekniikalla. Käytetty menetelmä valitaan tarkastettavan kohteen ja etsittävien vikojen luonteen perusteella. Tarkastuskohteella vietetty aika ja työskentelyetäisyys vaihtelevat menetelmän mukaan.



Kuva 19: Ammattiryhmän YV eristetyöt vuosiansiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 20: Ammattiryhmän YV siivous vuosiansiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 21: Ammattiryhmän YV säteilysuojeluhenkilöstö vuosiansiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla

Ultraäänitarkastukset ovat usein aikaavieviä, minkä lisäksi menetelmä vaatii tarkastajan työskentelevän tarkastettavan kohteen välittömässä läheisyydessä. Primäärijäähdytteen kanssa tekemisiin tulevien laitoskomponenttien tarkastus voi aiheuttaa jopa yhden millisievertin annoksen yhtä tarkastusta kohden. Joissakin tapauksissa on mahdollista automatisoida osa tarkastusprosessia ja siten vähentää tarkastajan säteilyaltistusta, mutta tämä ei yleisesti ole mahdollista tarkastettavien kohteiden ainutlaatuisuuden ja vaikean luoksepäästävyys takia. Pitkäkestoinen työskentely lähellä kontaminoituneita laitoskomponentteja kuten pääkierto- tai höyryputkia tai lämmönvaihtimia johtaa siihen, että osa materiaalitarkastajista saa suuria henkilökohtaisia säteilyannoksia.

Materiaalitarkastajat ovat konekunnossapitotöissä työskentelevien jälkeen suurin ammattiryhmä ydinvoimalaitoksilla. Tarkastajien suuren määrän takia heidän keskimääräiset annoksensa ovat ammattiryhmien keskitasoa, vaikka monet suurimmista henkilöannoksista aiheutuvat materiaalitarkastajille (Kuva 24). Materiaalitarkastuksista on molemmilla voimalaitoksilla kertynyt 11 % kollektiivisesta säteilyannoksesta.

5.2.7 Kiinteistötyöt

Kiinteistöillä tarkoitetaan laitoksen rakennuksien uusimista ja kunnossapitoa. Tyypillinen esimerkki on maalaustyöt, joilla ylläpidetään lattiapintojen kuntoa. Ydinvoimalaitosten valvonta-alueen lattiapinnat pyritään pitämään mahdollisimman hyvässä kunnossa, jotta niiden siivoaminen olisi mahdollisimman helppoa. Tällä pyritään helpottamaan mahdollisen pintakontaminaation puhdistamista.

Keskimääräisillä henkilöannoksilla mitattuna kiinteistöiden tekijät ovat Olkiluodossa neljänneksi pienimpiä annoksia saava työntekijäryhmä (Kuva 25). Loviisassa he sijoittuvat ammattiryhmien puoliväliin. Heidän kollektiiviannoksensa jäävät pieniksi, molemmilla laitoksilla noin kolmeen kymmeneen henkilömilliseverttiin. Olkiluodossa on ollut keskimäärin kolme kertaa enemmän kiinteistötyön tekijöitä annosseurannan piirissä kuin Loviisassa Olkiluodon voimalaitoksen valvonta-alue on vastaavasti selvästi suurempi kuin Loviisan voimalaitoksella voimaloiden erilaisen rakenteen takia.

5.2.8 Teline- ja haalaus

Teline- ja haalaus eli tavaroiden siirto työmaalla ovat jatkuvasti tehtäviä aputöitä. Nämä työntekijät joutuvat työskentelemään samoissa tiloissa kuin esimerkiksi tarkastus- tai asennustöitä tekevät ihmiset. Tämän vuoksi hekin altistuvat samalla tavalla säteilylle. Henkilökohtaisilla annoksilla mitattuna he ovat ammattiryhmien keskitasoa. Kollektiiviannokset ovat tällä ryhmällä suhteellisen pieniä johtuen verraten pienestä työntekijämäärästä. Yksilöannokset eivät kuitenkaan nouse heillä kovin suuriksi. Molemmilla laitoksilla teline- ja haalaustöihin osallistunut henkilö on ollut vain kerran kahden kymmenen suurimman annoksen saaneiden joukossa.

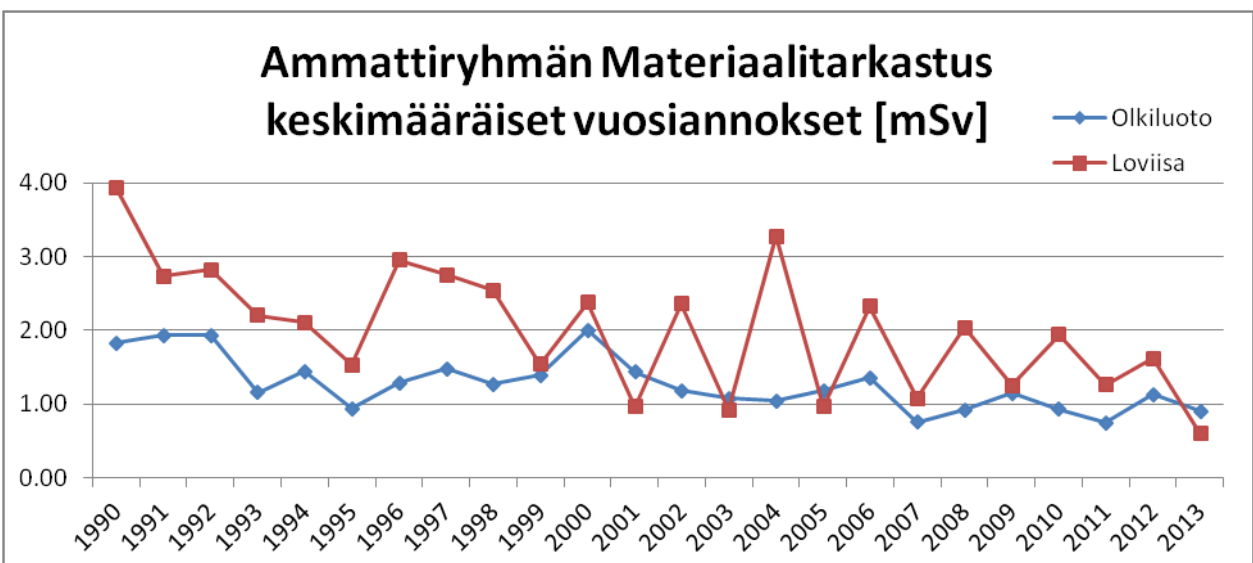
Vuosien 2005 ja 2006 suuret työt Olkiluodon turbiinirakennuksessa juuri niinä vuosina, kun järjestelmien aktiivisuus oli korkeimmillaan, näkyvät myös tässä ammattiryhmässä (Kuva 26). Vuonna 2004 Olkiluodon laitoksella ei kirjattu yhtään työntekijää tähän ammattiryhmään. Tänä vuonna muiden ammattiryhmien työntekijöiden lukumäärät eivät poikenneet merkittävästi omista trendeistään lukuun ottamatta eristetöiden tekijöitä. Heidän lukumääränsä oli noin neljäkymmentä henkeä suurempi kuin tarkastelujakson keskiarvo. Toisaalta heidän keskimääräinen henkilöannoksensa on tarkastelujakson matalin. On siis mahdollista, että vuonna 2004 teline- ja haalaustöihin osallistuneet on kirjattu virheellisesti eristetöiden ammattiryhmään.



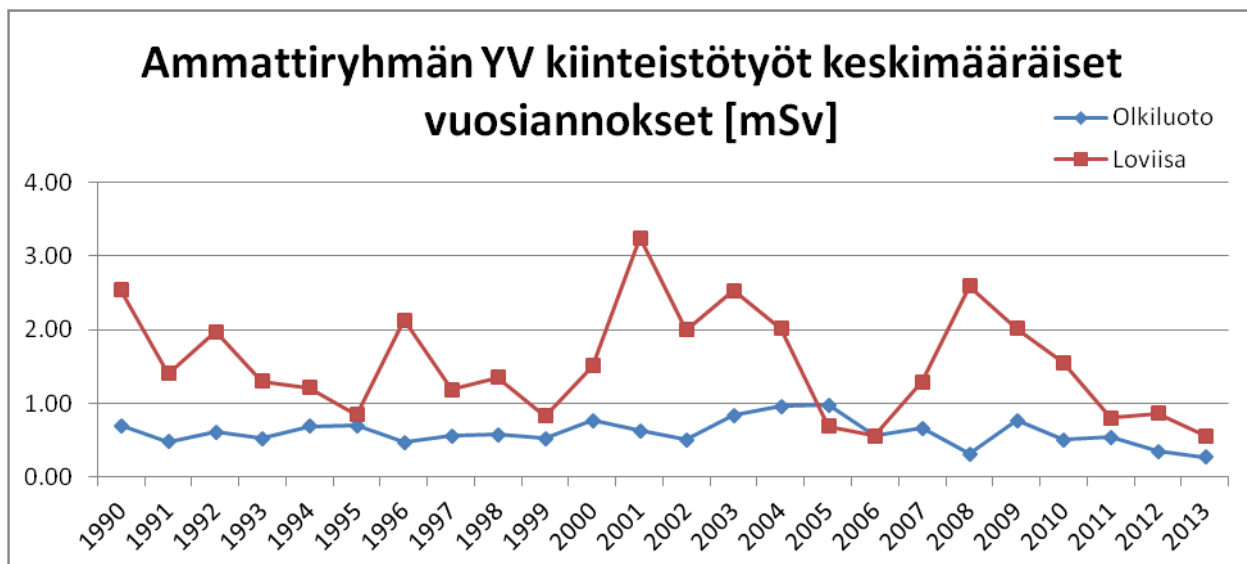
Kuva 22: Ammattiryhmän YV jätteiden käsittely ja dekontaminaatio vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 23: Ammattiryhmän YV mekaaniset ja konekunnossapitotyöt vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



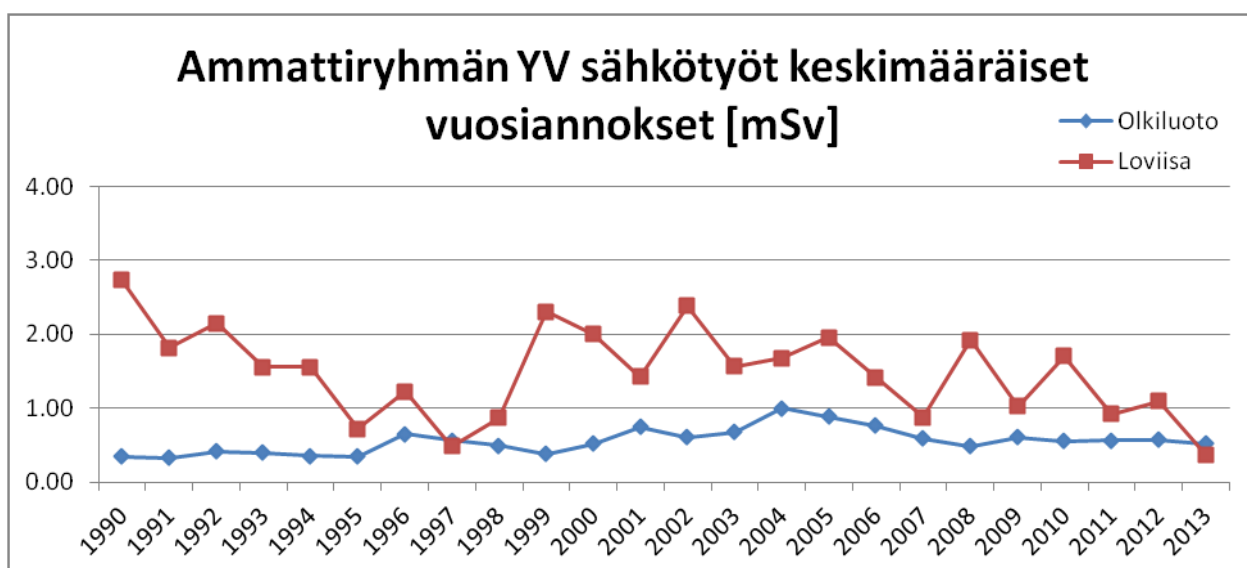
Kuva 24: Ammattiryhmän Materiaalitarkastus vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 25: Ammattiryhmän YV kiinteistötyöt vuosianneksten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 26: Ammattiryhmän YV telinetyöt ja haalaus vuosianneksten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 27: Ammattiryhmän YV sähkötyöt vuosianneksten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla

5.2.9 Sähkö- ja automaatiotyöt

Ydinvoimalaitosten korkean automaatioasteen takia laitoksilla on runsaasti erilaisia automaatiojärjestelmiä. Useilla järjestelmillä on kahdesta neljään redundanssia eli samantyyppisiä rinnakkaisia järjestelmiä. Lisäksi yhden toiminnon suorittamiseksi on keskenään erilaisia järjestelmiä, mitä kutsutaan diversiteetiksi. Useat tällaiset järjestelmät vaativat toimiakseen sähköä alkaen pääkierto- ja syöttövesipumpuista ilmastointiin ja säteilytasojen monitorointiin. Näistä syistä sähkö- ja automaatiotyöt työllistävät käytön ja vuosi- ja vuosikokouksen aikana paljon väkeä. Tämä ammattiryhmä onkin kolmanneksi suurin mekaanisen ja konekunnossapidon ja materiaalitarkastajien jälkeen.

Sähkö- ja automaatiotöissä työskentelevien säteilyannokset ovat olleet verraten pieniä. Olkiluodossa tämä ammattiryhmä on saanut kolmanneksi pienimpiä henkilökohtaisia annoksia. Loviisassa viisi ammattiryhmää on saanut pienempiä ja kahdeksan ryhmää suurempia henkilökohtaisia annoksia (Kuva 27). Kollektiiviannosten osalta sähkö- ja automaatiotyöt edustavat keskikastia. Tämä johtuu suureksi osaksi työntekijöiden suuresta määrästä. Suurimpien henkilökohtaisten säteilyannosten saajien joukossa sähkö- ja automaatiotyöntekijät ovat harvinaisia. Kahdenkymmenen suurimman annoksen joukossa heitä on vain harvakseltaan (Taulukko 6).

5.2.10 Instrumentointityö

Instrumentointityö oli ydinvoimalaitosten ensimmäisten vuosien dominoiva ammattiryhmä annosrekisterissä. Esimerkiksi vuonna 1980 Olkiluodon laitoksella kirjattiin säteilyannosta yhteensä 308 henkilölle. Näistä 196 ammattiryhmäksi oli merkitty instrumentointityö, kolmelle oli käytetty merkintää muut työt ja lopuilla 109 ei ollut mitään merkintää ammattiryhmästä. Sama ilmiö esiintyy Loviisan annostilastoissa. Vuodesta 1990 lähtien henkilöannoksiin on kirjattu ammattiryhmät luotettavasti ja säännönmukaisesti. Ammattiryhmämerkintä puuttuu korkeintaan muutamalta henkilöltä vuosittain. Heidän saamansa säteilyannokset ovat pieniä.

Instrumentointitöihin kuuluu muun muassa reaktorin neutronivuota mittaavien antureiden asennusta ja huoltoa. Alkaen vuodesta 2009 Loviisassa ja 2011 Olkiluodossa instrumentointityöt on tilastoitu automaatiotöiden joukossa ammattiryhmässä Sähkö- ja automaatiotyöt.

Instrumentointitöihin osallistuneiden keskimääräiset henkilöannokset ovat pieniä, pääsääntöisesti yhden millisievertin luokkaa molemmilla laitoksilla (Kuva 28). Kollektiiviannoksilla mitattuna he ovat ammattiryhmien keskitasoa. Olkiluodon laitoksella instrumentointitöiden tekijöiden keskimääräinen henkilöannos on pysynyt varsin tasaisena. Loviisassa on vuosina 1999 ja 2004 kertynyt poikkeuksellisen suuret henkilöannokset instrumentointitöistä. Vuoden 1999 suuret säteilyannokset johtuvat molempien laitosten höyrytintilan kaapeleiden uusimisesta lämpötilojen aiheuttaman vanhenemisen takia.

Vuoden 2004 kasvu keskimääräisissä henkilöannoksissa johtuu kuuden instrumentointitöihin osallistuneen henkilön suurista, eli seitsemän millisievertin annoksista. Vuonna 1999 annosjakauma on tasaisempi, viisi henkilöä sai yli 10 millisievertiä ja yhteensä 30 henkilöä sai pitkän ajan keskiarvon ylittävän annoksen, kun koko ammattiryhmän koko on keskimäärin 39 henkeä Loviisassa.

5.2.11 Polttoainetyöt

Polttoaineen vaihto on osa jokaista vuosihuoltoseisokkia. Reaktorin polttoaineesta poistetaan vuosittain noin neljäsosa, minkä lisäksi reaktoriin jäävää polttoainetta siirretään uusiin positioihin ja tuoretta polttoainetta ladataan reaktoriin poistetun tilalle. Polttoaineen siirrot tehdään tarkoitukseen rakennetulla koneella siten, että tuore ja käytetty polttoaine on koko ajan veden alla. Polttoaine on ilman veden tuomaa säteilysuojaa vain ennen käyttöä, jolloin polttoaine ei aiheuta merkittävää säteilyvaaraa työntekijöille.

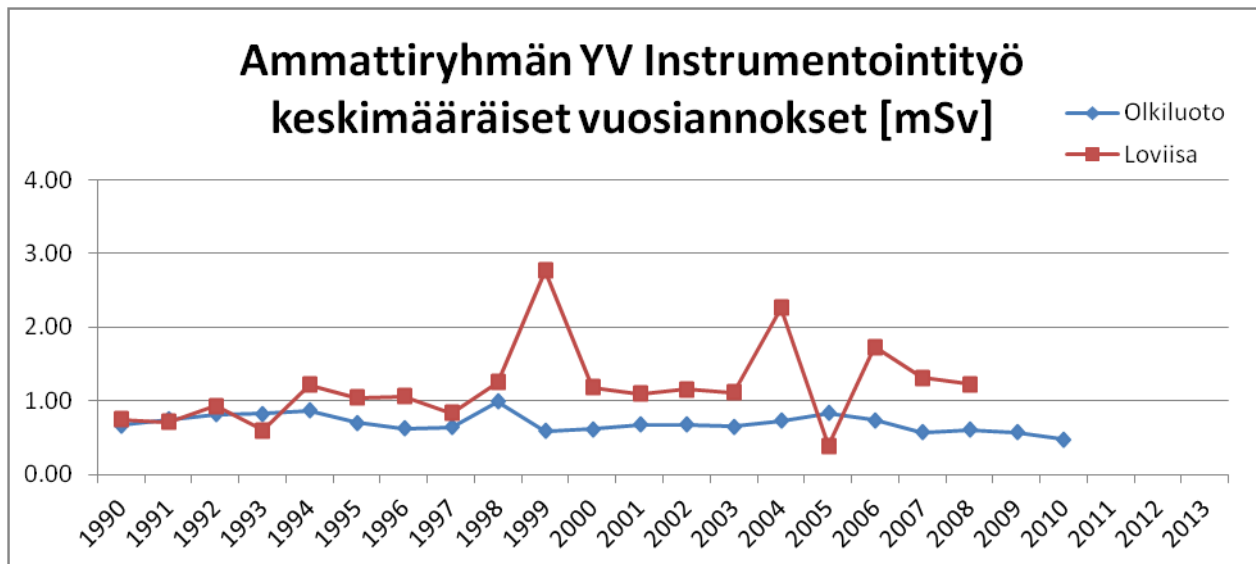
Polttoainetöistä aiheutuu verraten pieniä säteilyannoksia työntekijöille. Ammattiryhmään myös kuuluu vähän ihmisiä, joten kollektiiviannoksilla mitattuna polttoainetöihin osallistujat altistuvat kaikkein vähiten säteilylle. Olkiluodossa polttoainetöiden tekijät tekevät myös jätteenkäsittelyä, jolloin työt ja niistä kertyneet annokset kirjataan toiselle työkoodille. Henkilöannoksilla mitattuna polttoainetöissä työskentelevät ovat Olkiluodossa toiseksi ja Loviisassa neljänneksi vähiten säteilyä saava ammattiryhmä (Kuva 29).

Olkiluodon laitoksella kirjattiin vuonna 2000 poikkeuksellisen suuria säteilyannoksia polttoainetöistä. Nämä aiheutuivat uudessa kosteudenerottimessa havaittujen säröjen korjaustöistä. Syöttövesijakajista virtaava kylmä syöttövesi ja reaktorin läpi nouseva kuuma kiehuva vesi aiheuttivat kosteudenerottimelle liian suuria lämpörasituksia.

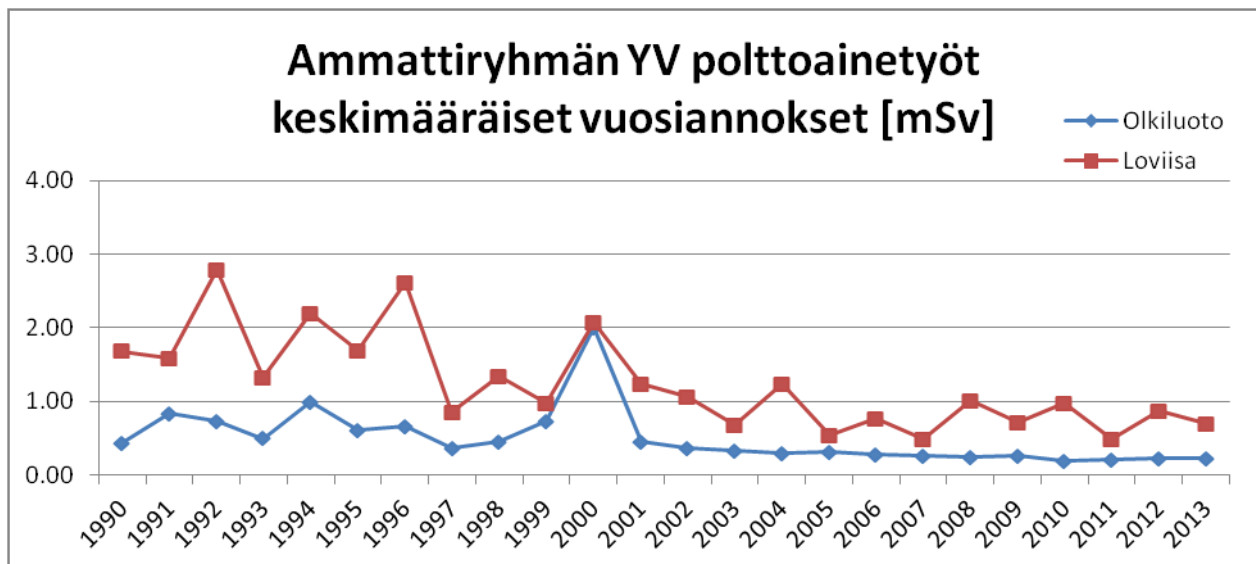
Korjaustyöt tehtiin sukellustoina ja niihin osallistuneet ulkomaalaiset urakoitsijat merkittiin polttoainetöiden ammattiryhmään, mikä johti poikkeuksellisen suureen tälle ammattiryhmälle kirjattuun keskimääräiseen säteilyannokseen. Polttoainetöissä ulkomaalaisten työntekijöiden osuus on tavallisestikin suuri, johtuen polttoainevalmistajien osallistumisesta ydinpolttoaineen laadunvalvontaan ja tarkastuksiin.

5.2.12 Laboratoriotyöt

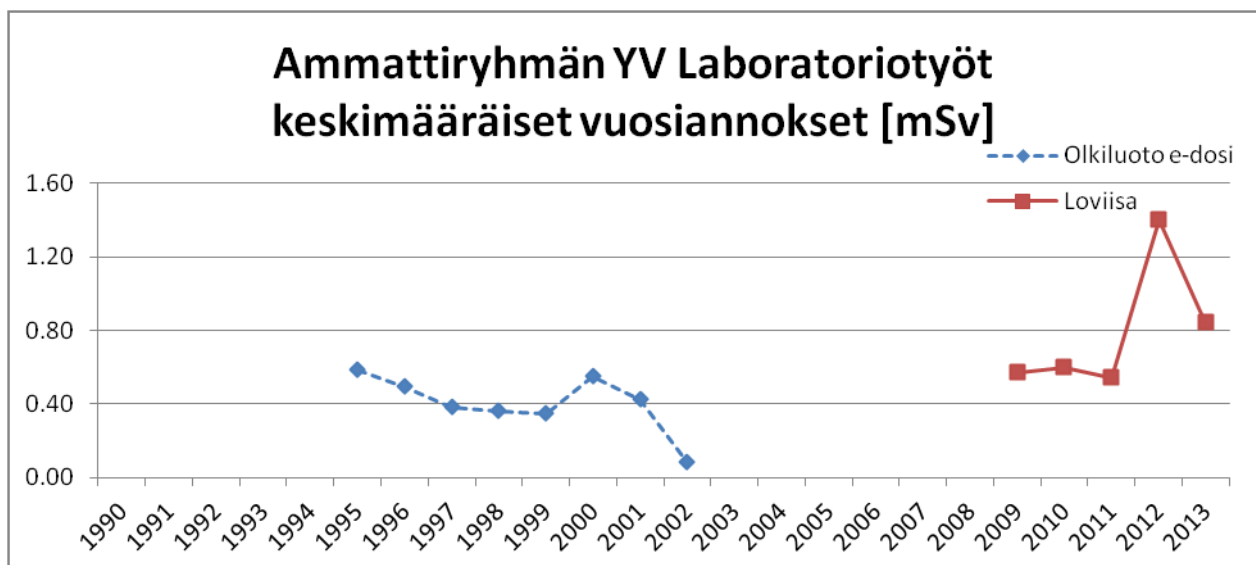
Laboratoriotyöt on uusi, vasta vuonna 2009 Loviisassa käyttöön otettu ammattiryhmätunnus. Ammattiryhmä ei ole käytössä Olkiluodon laitoksella, vaan laboratoriotöihin osallistujat tunnistetaan näiden henkilöiden organisaatiotunnuksista. Olkiluodon sähköisessä annosvalvontajärjestelmässä on kuitenkin erikseen työkoodit laboratoriotyölle. Näitä työkoodeja on käytetty vuosina 1995 – 2002. Sähköisellä dosimetrillä ja termoluminesenssidosimetrillä mitatut annokset eivät ole sellaisenaan vertailukelpoisia johtuen dosimetrien erilaisesta herkkyydestä. Tuloksista voidaan siis päätellä vain suuruusluokkaa. Aineistoin perusteella laboratoriotyötä tekevien ihmisten säteilyaltistus voimallaisilla on varsin vähäistä. He ovatkin kollektiiviannoksilla mitattuna vähiten altistuva ammattiryhmä ja henkilöannoksilla mitattuna Loviisassa kolmanneksi vähiten altistuva ammattiryhmä (Kuva 30). Vuoden 2012 suurempi keskimääräinen henkilöannos johtuu etupäässä kolmen henkilön saamista 4 – 7 millisievertin säteilyannoksista. Suurimpien säteilyannosten listalla laboratoriotyötä tekevä henkilö esiintyy vain kerran, vuonna 2013. Tämä johtuu ensisijassa vuoden 2013 säteilyannosten alhaisesta tasosta eikä niinkään suuresta annoksesta laboratoriotyössä.



Kuva 28: Ammattiryhmän YV Instrumentointityö vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



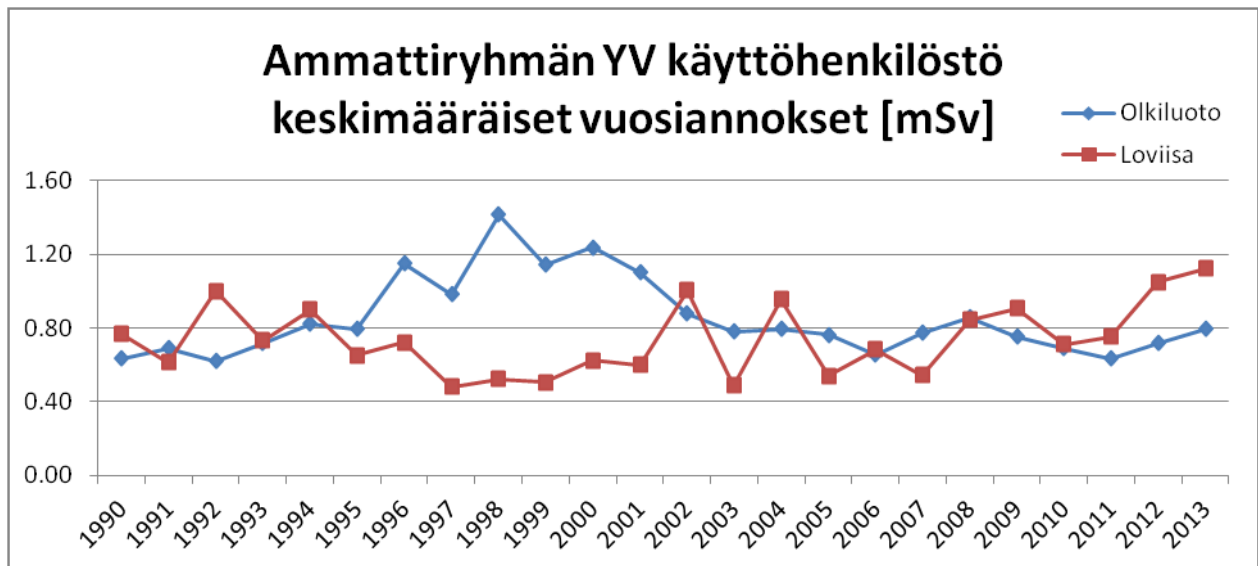
Kuva 29: Ammattiryhmän YV polttoainetyöt vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



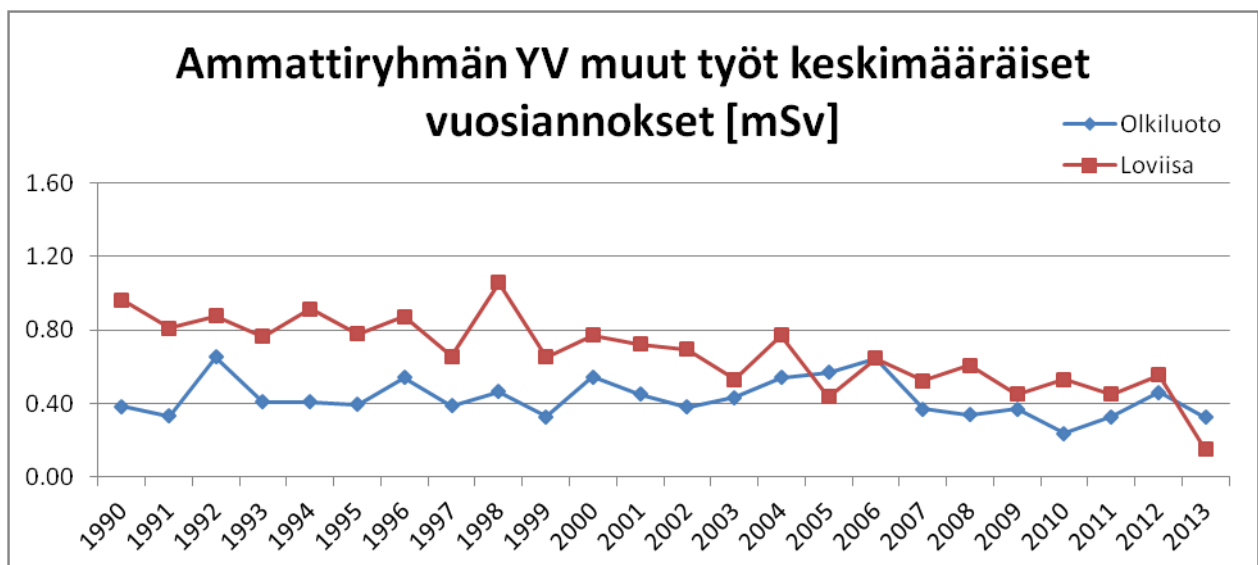
Kuva 30: Ammattiryhmän YV Laboratoriotyöt vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla

5.2.13 Käyttöhenkilöstö

Käyttöhenkilöstö vastaa laitoksen prosessien ohjauksesta ja valvonnasta sekä käytön että vuosihuollon aikana. Valvomohenkilökuntaan kuuluu tyypillisesti vuoropäällikkö, reaktoriohjaaja, turbiiniohjaaja sekä näiden lisäksi muita henkilöitä kuten valvomoteknikoita. Valvomotyöskentelyn lisäksi käyttöhenkilöstö kiertää laitoksella käytön aikana tarkastuskierroksilla. Kierroksilla tarkastetaan mahdollisia vuotoja ja apulaitteiden kuten pumppujen toimintaa. Tämän lisäksi prosessien ohjaus ja erotus on heidän vastuullaan, mikä käytännössä tarkoittaa venttiilien ja toimilaitteiden käyttöä paikan päällä. Käyttöhenkilöstön säteilyannokset kertyvät laitoskierrosten aikana, valvomotyöskentely ei aiheuta säteilyannosta.



Kuva 31: Ammattiryhmän YV käyttöhenkilöstö vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla



Kuva 32: Ammattiryhmän YV muut työt vuosiannosten keskiarvot suomalaisilla ydinvoimaloilla

Käyttöhenkilöstön henkilöannokset ovat olleet keskimäärin pieniä, molemmilla voimalaitoksilla alle 1 mSv vuodessa. Olkiluodon voimalaitoksella käyttöhenkilöstön keskiannot saavuttivat huippunsa, noin 1,2 mSv tason 1990 – 2000-lukujen vaihteessa (Kuva 31). Henkilömäärältään käyttöhenkilöstö on Olkiluodossa viidenneksi ja Loviisassa kuudenneksi suurin työntekijäryhmä. Suurempia ryhmiä ovat mekaaninen ja konekunnossapito, materiaalitarkastajat, sähkötyöt, siivous ja Loviisassa muut työt.

Kollektiiviannoksilla mitattuna käyttöhenkilöstö on Olkiluodossa ammattiryhmien keskitasoa ja Loviisassa kolmanneksi vähiten säteilyä saava ammattiryhmä. Loviisassa vain muut työt –ammattiryhmä on saanut keskimäärin pienempiä henkilökohtaisia annoksia kuin käyttöhenkilöstö. Olkiluodossa on viisi ammattiryhmää, joiden keskimääräiset henkilökohtaiset säteilyannokset ovat pienemmät kuin Olkiluodon käyttöhenkilöstön saamat säteilyannokset.

5.2.14 Muut työt

Ydinvoimaloilla tehtävistä töistä kaikki eivät sovellu luokiteltaviksi yllä esiteltyihin ammattiryhmiin. Tällaisia töitä tekevät työntekijät on merkitty muut työt –ammattiryhmäkoodilla. Tähän ryhmään kuuluu muun muassa vartiointi- ja palovartiointihenkilöstö. Heidän henkilökohtaiset annoksensa ovat kaikkein pienimmät molemmilla laitoksilla. Ammattiryhmä on kuitenkin monilukuinen, Loviisassa jopa kolmanneksi suurin ja Olkiluodossa kuudenneksi suurin. Suuri lukumäärä aiheuttaa sen, että kollektiiviannoksilla mitattuna he ovat Olkiluodossa kolmanneksi ja Loviisassa kuudenneksi pienimmän annoksen saaneita (Kuva 32).

Loviisan laitoksella muut työt –ryhmään kuulunut henkilö ei ole koskaan kuulunut kahdenkymmenen suurimman annoksen saaneiden joukkoon. Olkiluodossa näin on käynyt neljä kertaa (Taulukko 6).

5.3 Työkohdekohtaiset annokset

Termoluminesenssidosimetreilla tehtävän virallisen annosvalvonnan lisäksi voimalaitoksilla on nykyään käytössä sähköiset dosimetrit. Näiden avulla on mahdollista seurata annosten kertymistä ammattiryhmien sijaan yksittäisen työkoodin tarkkuudella. Työkoodien yksityiskohtaisuus vaihtelee turbiinirakennuksen yleisistä töistä yhden nimenomaisen venttiilin huoltotöihin. Työkoodien perusteella voi myös tehdä arvioita rakennuskohtaisista annoksista. Olkiluodon reaktori- ja turbiinirakennusten annoksissa näkyy selvästi paitsi vuosihuoltojen vuorottelutahti myös turbiinirakennuksen suuret työt vuosina 2005 ja 2006 (Kuvat 33 ja 34).

5.3.1 Höyrystintila

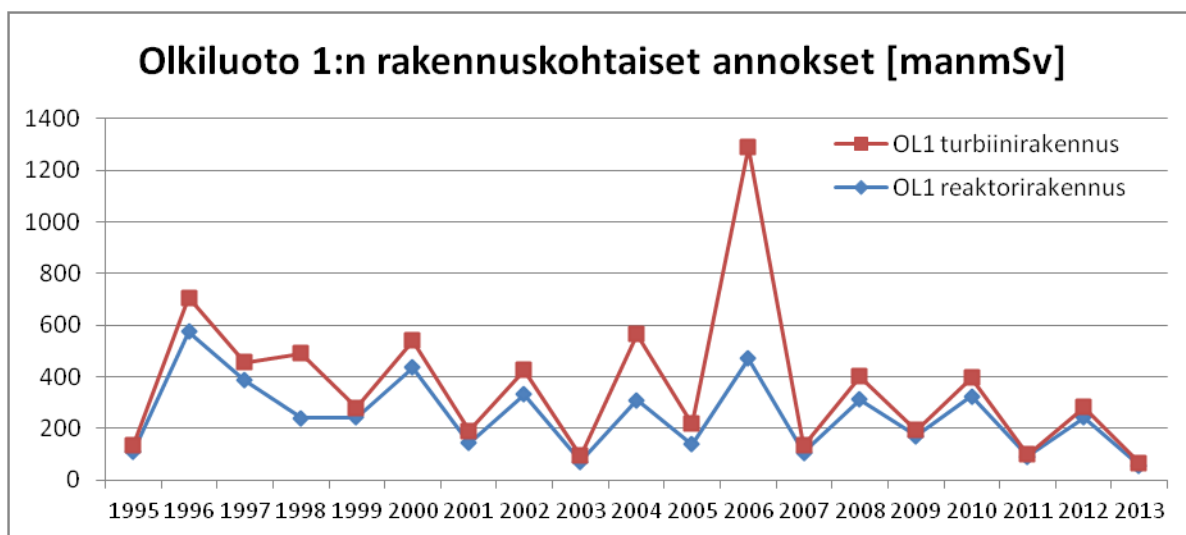
Loviisan painevesilaitoksilla säteilysuojelun kannalta hankalimmat työtilat ovat suojarakennusten höyrystintilat. Tilat ovat ahtaat ja täynnä säteileviä primääripiirin komponentteja. Höyrystinten lisäksi pääkiertoputket sekä primäärijäähdytteen puhdistusjärjestelmän (TC) lämmönvaihtimet ovat merkittäviä säteilylähteitä. Höyrystinten eristeistä kertyy tuntuvia säteilyannoksia työntekijöille. Jos höyrystinten primääripuoli täyttyy avata, on olemassa pinta- ja ilmakontaminaation vaara. Siivoustyöt ja muovitukset lisäävät työtehtäviä ja siten altistusta säteilylle. Lisäksi suojavarusteiden käyttö hidastaa työtä muutenkin ahtaassa tilassa.

Höyrystintilassa vallitseviin säteilytasoihin voidaan vaikuttaa höyrystinten vesitäytöllä. Höyrystinten täyttäminen vedellä pienentää annosnopeuksia veden vaimentavan vaikutuksen takia. Töiden sopivalla ajoittamisella ja koordinoimalla työt yhdessä käyttöhenkilöstön kanssa voidaan saavuttaa annossäästöjä [34]. Pidemmässä vuosihuollossa töitä voidaan myös aikatauluttaa myöhempään ajankohtaan, jolloin lyhytikäisemmät aktivointustuotteet ehtivät puoliintua primääripiirin pinnoilta, millä saavutetaan lisää annossäästöä [29].

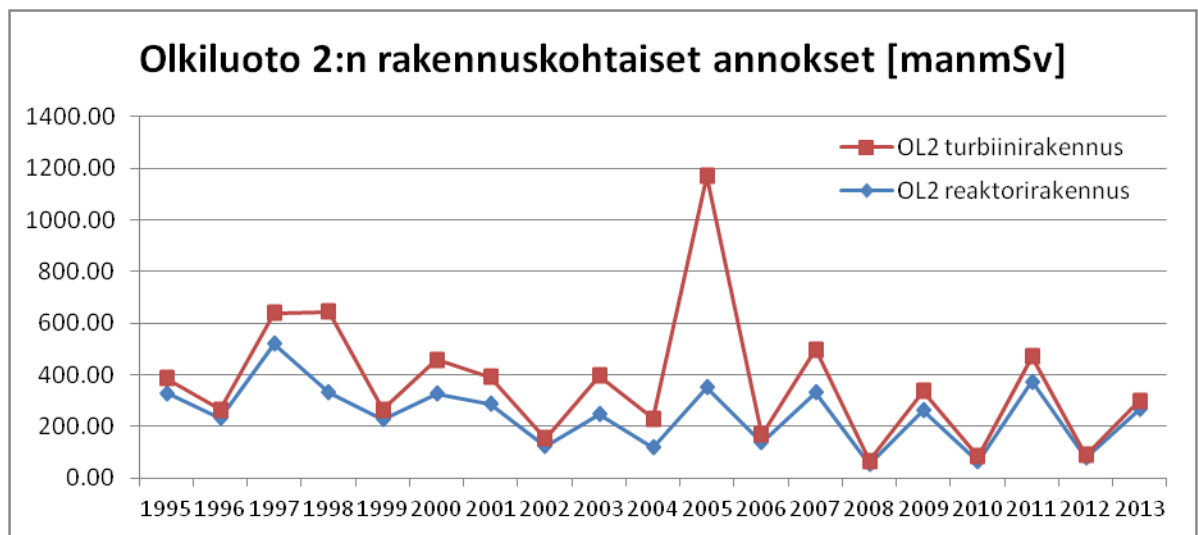
5.3.2 Reaktori

Jokaisessa vuosihuollossa reaktori avataan tarkastusta ja polttoaineenvaihtoa varten. Vuosittain toistuva työ on opittu tekemään mahdollisimman nopeasti ja pienellä miehistyksellä. Reaktorin alikriittiseksi ajamisen jälkeen on odotettava, kunnes reaktoriveden aktiivisuus on laskenut riittävän alhaiseksi. Aktiivisuus johtuu radiolyyysituotteista, polttoaineesta vapautuneista jalokaasuista tai polttoainevuodosta vapautuneesta jodista. Reaktorivettä kierrätetään puhdistusjärjestelmien kautta kunnes aktiivisuus on laskenut riittävästi ja reaktorin paineastian kansi voidaan avata. Jos käyttöjakson aikana on tapahtunut polttoaineaurio, reaktorin avaaminen voi johtaa reaktorihallin ilmakontaminaatioon, mikä aiheuttaa suojavarusteiden käyttötarpeen ja hidastaa töitä.

Reaktorin sisäosien purku- ja kasaustyöt ovat säteilysuojelun kannalta haasteellisia töitä, sillä reaktorin paineastian sisäpuoliset komponentit säteilevät voimakkaasti. Reaktorin paineastian sisäosat ovat painevesi- ja kiehutuslaitoksella varsin erilaiset. Olkiluodon kiehutusvesilaitoksen paineastian sisällä on polttoaineen yläpuolella kosteudenerotin sekä höyrynkuivain. Näiden komponenttien nostojen aikana reaktorihallin säteilytaso nousee korkeaksi. Tällöin reaktorihallista ei tehdä muita töitä. Syöttövedenjakajien nosto ja pesu ovat myös säteilysuojelun kannalta erittäin haasteellisia töitä, sillä ne vaativat työskentelyä hyvin lähellä voimakkaasti säteileviä komponentteja.



Kuva 33: Rakennuskohtaiset kollektiiviset annokset OL1-laitoksella elektronisten työdosimetrien perusteella



Kuva 34: Rakennuskohtaiset kollektiiviset annokset OL2-laitoksella elektronisten työdosimetrien perusteella

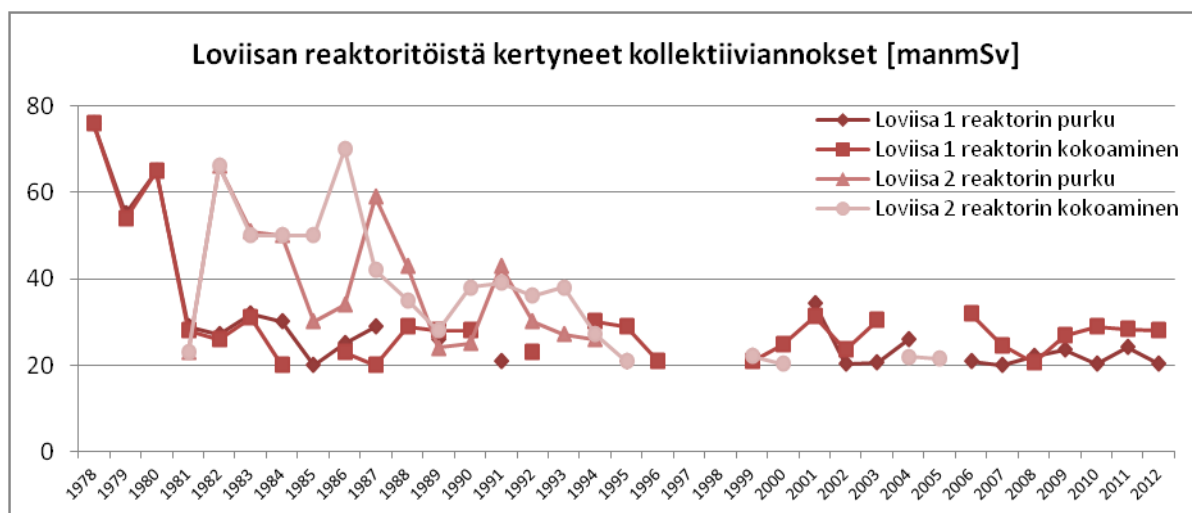
6 Toimintatapojen vaikutus säteilyannoksiin

6.1 Vuosihuoltojen suunnittelu

Vuosikymmenien aikana ydinvoimayhtiöt ovat oppineet suorittamaan vuosihuollon tehokkaammin. Ydinvoiman kustannukset aiheutuvat pääosin laitosten rakentamisesta. Polttoaineen kulutuksen vaikutus kustannuksiin on pienempi kuin useilla muilla sähkön tuotantotavoilla, joten ydinvoimalaitosten käyttäminen täydellä teholla on lähes aina kannattavin vaihtoehto. Tämän takia huolto- ja polttoaineenvaihtoseisokit pyritään suorittamaan mahdollisimman nopeasti. Sähkön tukkuhinnan (Nordpool Spot Price) päiväkeskiarvot vaihtelevat Suomessa karkeasti välillä 30 – 40 €/MWh. Yhden ydinreaktorin päivässä tuottaman sähkön hinnaksi muodostuu 30 €/MWh hinnalla Loviisan laitoksella noin 350 000 euroa ja Olkiluodon voimalaitoksella 630 000 euroa päivässä [55]. Vuosihuollon mahdollisimman tehokas suorittaminen on siis ennen kaikkea taloudellinen kysymys.

Olkiluodon voimalaitoksella on vuodesta 2001 lähtien suoritettu toisella laitosyksiköllä lyhyt polttoaineenvaihtoseisokki ja toisella pidempi huoltoseisokki. Ensin toteutetaan polttoaineenvaihtoseisokki ja sen jälkeen huoltoseisokki. Näin työtapoja voidaan harjoitella säteilysuojelun kannalta helpommassa seisokissa ennen haastavampaa. Vuonna 2014 vuosihuollot suoritettiin käänteisessä järjestyksessä, jotta välttyttiin helatorstaina teetetävästä työstä aiheutuvat lisäkustannukset. Ennen helatorstaita suoritettiin OL1:n huoltoseisokki ja kesäkuun alussa OL2:n polttoaineenvaihtoseisokki. Revisioista kertynyt säteilyannos jäi erittäin alhaiseksi. Elektronisten työdosimetrien perusteella säteilyannosta kertyi yhteensä 518 manmSv. Kollektiivinen säteilyannos on siis ennätysalhainen tai ainakin lähellä sitä. Vastoin ennako-odotuksia vuosihuoltojen käänteisellä järjestyksellä ei näytä olleen vaikutusta kertyneisiin kollektiiviannoksiin.

Teollisuuden Voima on onnistunut lyhentämään polttoaineenvaihtoseisokit vain hiukan yli viikon mittaisiksi. Pitempien huoltoseisokkien kesto vaihtelee kahdesta neljään viikkoon riippuen tehtävien töiden määrästä. Huoltotöiden laajuus ja siten vuosihuollon kesto määräytyy laitoksen kunnossapitosuunnitelmasta ja ilmenevistä laitevioista. Säteily-suojelutyöllä ei voida vaikuttaa tehtävien töiden määrään, ainoastaan töistä aiheutuvaan säteilyannokseen. Koska vuosihuolto pyritään suorittamaan mahdollisimman nopeasti, pyritään laitoksella tekemään samanaikaisesti niin montaa huoltotyötä kuin mahdollista.

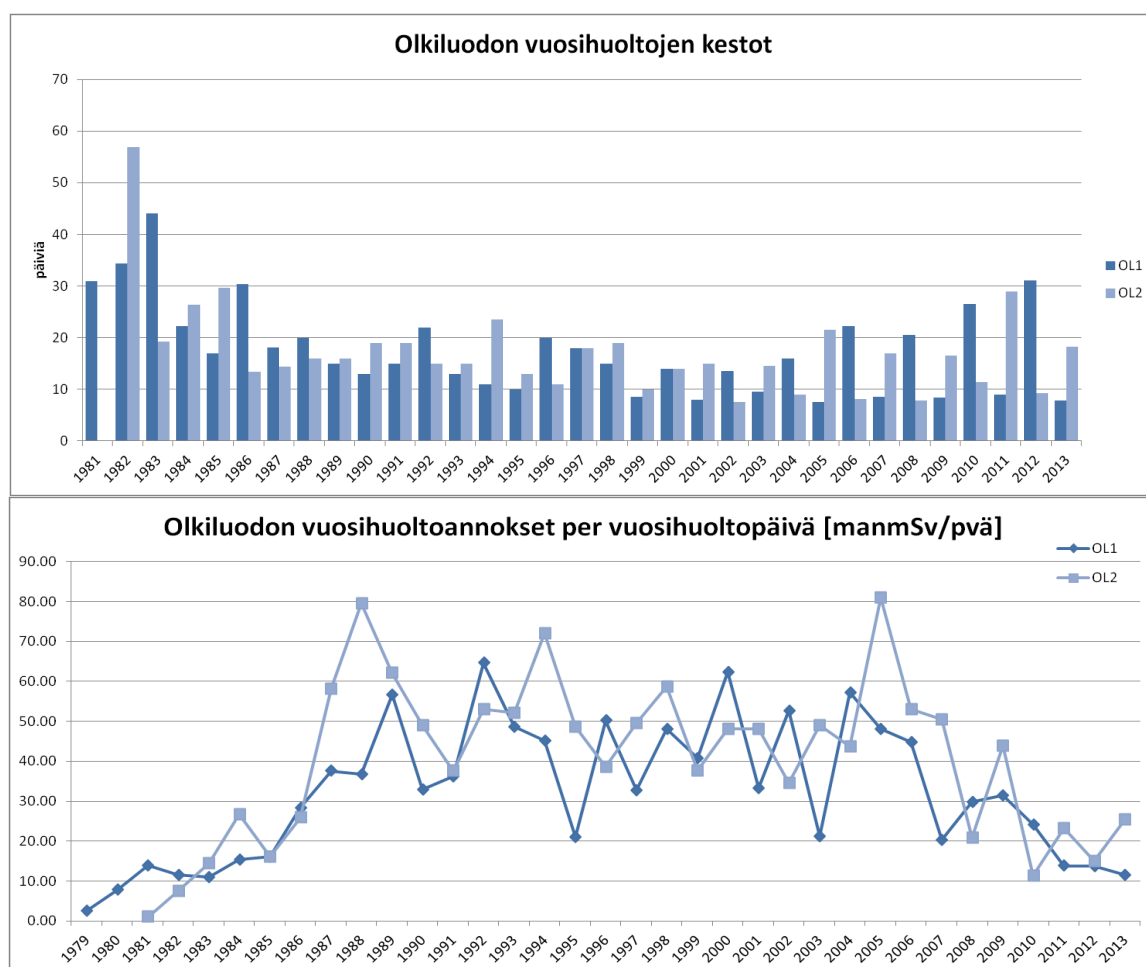


Kuva 35: Loviisan voimalaitoksella reaktorien purkamisesta ja kokoamisesta kertyneet kollektiiviannokset

Yhden laitoksen vuosihuoltojen kesto kuvaa paitsi huoltotöiden määrää myös niiden yhteensovittamisen onnistumista. Erilaisten laitosten seisokkien kestojen vertailua haittaa laitosten erilainen rakenne, mikä vaikuttaa merkittävästi vuosihuollon kestoan. Yhden työpäivän aikana kertynyt säteilyannos taas kuvastaa paitsi työntekijöiden määrää laitoksella, myös laitoksen säteilytasoa ja säteilysuojelutyön onnistumista.

Suomalaisten ydinvoimalaitosten huoltoseisokit ovat keskiarvoa lyhyemmät. OECD-maissa vuosihuoltojen keskipituus on kevytvesireaktoreilla noin 50 päivää [56]. Vuosiraporttien perusteella Loviisan voimalaitoksen kaikkien vuosihuoltojen pituuksien keskiarvo on hieman alle 30 päivää ja Olkiluodon voimalaitoksen noin 17,5 päivää. Päivässä kertynyt säteilyannos nousi laitosten ensimmäisten käyttövuosien aikana noin 1980 – 1990-lukujen vaihteeseen asti. Tähän vaikuttaa kaksi tekijää: lyhentyvät seisokit ja aktivoitumistuotteiden kertyminen laitoksen järjestelmiin ja sitä kautta korkeammat säteilytasot.

Päivässä kertyvät säteilyannokset pysyivät Olkiluodossa samantasoisina vuosien 2005 ja 2006 suuriin huoltoseisokkeihin asti (Kuva 36). Tällöin korkean höyrynkosteuden aiheuttama säteilytasojen kasvu turbiinirakennuksessa aiheutti aiempaa korkeammat päivässä kertyneet säteilyannokset. Uusien höyrynkuiwanten asennuksen jälkeen turbiinilaitoksen säteilytasot ovat alentuneet noin 10 – 15 % vuodessa. Tämä näkyy selvästi myös päivässä kertyneissä säteilyannoksissa ja on johtanut Olkiluodon laitosten ennätysalhaisiin kollektiiviannoksiin viime vuosina.

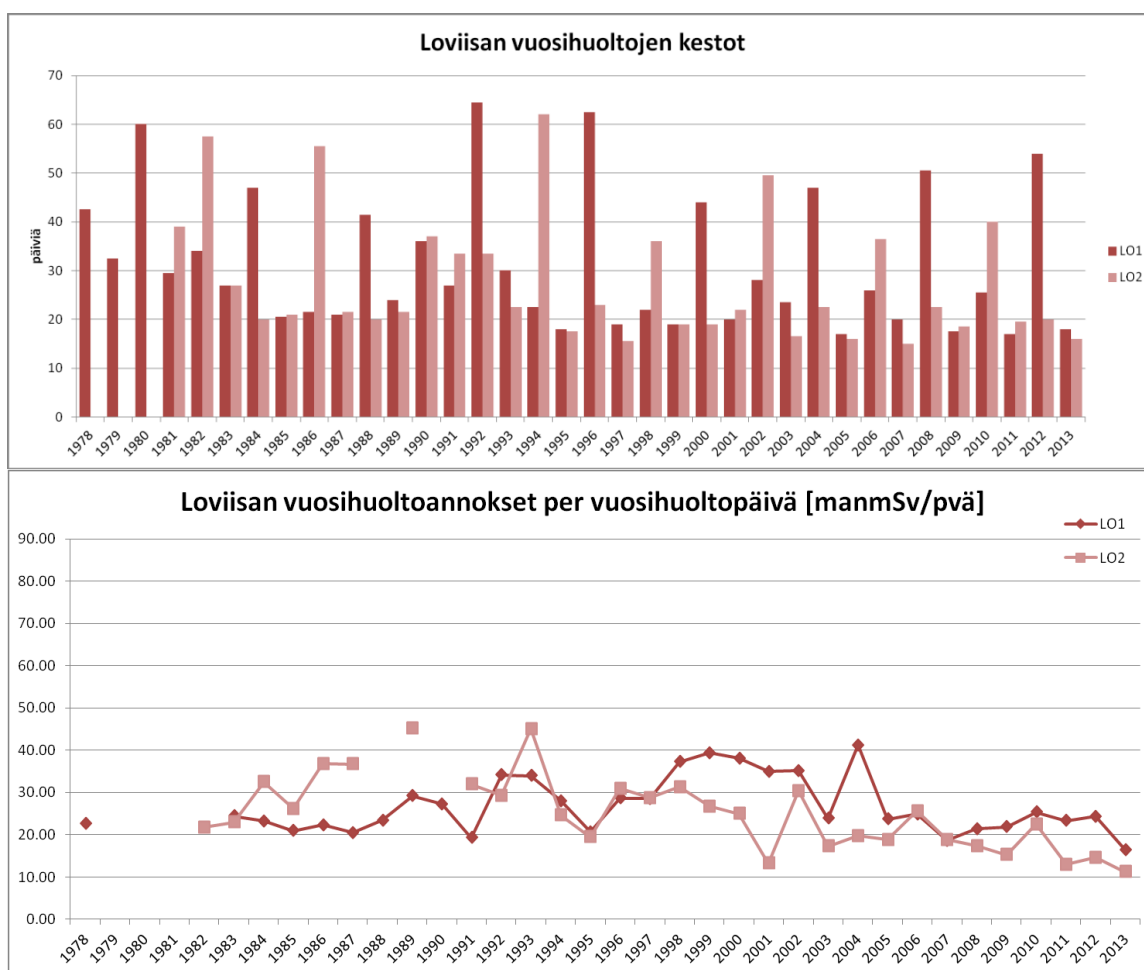


Kuva 36: Olkiluodon voimalaitoksen vuosihuoltojen kestot sekä niistä keskimäärin yhdessä päivässä kertyneet kollektiiviset säteilyannokset

Loviisan voimalaitoksella huoltoseisokin pituus korreloi vahvasti seisokista aiheutuvat säteilyannoksen kanssa (Kuva 37). Päivässä kertynyt annos on pysynyt suurin piirtein samansuuruisena laitosten käyttöhistorian aikana. Vuoden 2004 jälkeen käyttöön otetut uudet toimintatavat näyttävät pienentäneet säteilyannosta nimenomaan säteilytasoja pienentämällä. Vuosihuoltojen kestot eivät ole lyhentyneet, Loviisa 1 -yksiköllä pidempien huoltoseisokkien kesto on päinvastoin kasvanut. Työpäivässä kertynyt säteilyannos on kuitenkin pienentynyt molemmilla laitaisyksiköillä. Vuoden 2004 jälkeen päiväannokset ovat jääneet pitkän aikavälin keskiarvon alle kummallakin laitoksella. Erityisesti Loviisa 2 -yksiköllä päiväannokset ovat pienentyneet viime vuosina selvästi. Seisokkien pituudessa ei ole tapahtunut merkittävää muutosta suuntaan tai toiseen, joten henkilöstön kollektiivinen säteilyannos on laskenut tasaisesti. Loviisa 2 -yksikön töistä kertynyt kollektiiviannos onkin laskenut viime vuosina ennätysellisen alas (Kuva).

6.2 Säteilysuojelu osana työsuojelua

Suurin ero ydinvoimalaitoksen ja muiden teollisten työskentely-ympäristöjen välillä on ydinvoimalaitoksessa oleva säteilyvaara. Tämän lisäksi ydinvoimalaitoksella täytyy huomioida muut työturvallisuuteen vaikuttavat tekijät kuten palo-, sähkö- ja nostotyöturvallisuus. Säteilyltä suojautuminen voidaan jakaa kahteen erilaiseen vaaratekijään, joilta suojautuminen tapahtuu eri tavoilla: suoraan säteilyyn ja kontaminaatioon. Suoralta säteilyltä suojaudutaan rajoittamalla työskentelyaikaa säteilevissä tiloissa, pysyttelemällä mahdollisimman kaukana säteilevistä komponenteista kuten putkilinjoista ja käyt-



Kuva 37: Loviisan voimalaitoksen vuosihuoltojen kestot sekä niistä keskimäärin yhdessä päivässä kertyneet kollektiiviset säteilyannokset

tämällä esimerkiksi lyijymattoja säteilysuojina. Kontaminaatiolta suojaudutaan suojava-rusteilla kuten haalareilla, suojakäsineillä sekä tarvittaessa hengityssuojaimilla tai koko kehon suojaavilla ylipainepuvuilla.

Suojavarusteet voivat hidastaa ja vaikeuttaa työntekoa jos ne ovat epämukavia tai rajoit-tavat liikkeitä. Suojavarusteiden hyvä ergonomia ja laatu ovatkin tärkeitä tekijöitä niiden käytön yleistymisessä. Suojavarusteiden käyttö on yleistynyt sekä teollisuudessa yli-päänsä että ydinvoimaloilla. Tehtävää tällä saralla on vieläkin, erityisiä puhdistustoi-menpiteitä kuten suihkua tai saunottamista vaativia kontaminaatiotapauksia sattuu edelleen muutamia jokaisessa seisokissa. Vakavilta kontaminaatiotapauksilta on viime vuosina välttytty.

Henkilökontaminaation vaarallisin seuraus on sisäinen säteilyannos. Jos säteilevää ai-netta päätyy kehon sisään esimerkiksi hengityksen tai haavan kautta, siitä seuraavan sä-teilyannoksen vähentäminen voi olla mahdotonta. Tämän takia kontaminaation ja sisäi-sen säteilyannoksen ehkäiseminen on tärkeää, vaikka ulkoisesta säteilystä aiheutuva sä-teilyannos on yhtä vaarallinen kuin samansuuruinen sisäisestä säteilystä aiheutuva an-nos. Vuoden 1993 jälkeen suomalaisilla ydinvoimaloilla ei ole aiheutunut yli 1 mSv suu-ruista sisäistä säteilyannosta (Kuva 38). Vuosituhannen vaihteen jälkeen suurin sisäinen säteilyannos on ollut 0,5 mSv, joka aiheutui vuonna 2002 mekaanista ja konekunnossa-pitoa tehneelle työntekijälle Loviisassa.

Säteilysuojelun onnistumisen kannalta on tärkeää, että se mielletään kiinteäksi osaksi töiden suunnittelua ja toteutusta. Säteilysuojelullisten riskien tunnistamiseksi säteily-vaarallisissa tiloissa tehtäviä töitä varten laaditaan työmääräimen osaksi säteilytyölupa tai säteilytyöohje. Säteilytyöohjetta voidaan käyttää töissä, joissa ei avata aktiivisia kom-ponentteja ja työstä aiheutuva säteilyannos on alhainen [57]. Säteilytyöluvan hyväksyy säteilysuojeluorganisaation työntekijä tai vuoropäällikkö [16]. Näin pyritään varmista-maan, että työtehtävien säteilyriskit huomioidaan etukäteen ja annoksen minimoimisek-si ryhdytään asianmukaisiin toimiin. Lisäksi niistä töistä, joista aiheutuvan kollektiivisen säteilyannoksen arvioidaan ylittävän 20 manmSv, laaditaan erillinen säteilysuojelu-suunnitelma.



Kuva 38: Suomalaisilla ydinvoimaloilla kertyneet sisäiset säteilyannokset sekä suurin sisäinen vuosian-nos

6.3 Viranomaisvalvonta

Säteilyturvakeskus valvoo suomalaisten ydinvoimaloiden toimintaa. Henkilöstön säteilyaltistus on yksi valvonnan kohde ydinturvallisuuden ohella. Säteilyturvakeskus myös asettaa viranomaisvaatimukset, jotka lopulta pohjaavat eduskunnan säätämiin lakeihin säteilyn ja ydinvoiman käytöstä. Käytännössä valvontatyö on asiakirjojen tarkastamista, luvanhaltijoiden kanssa keskustelemista sekä tarkastuskäyntejä laitoksille käynnin ja seisokkien aikana. Lisäksi säteilyaltistusta valvotaan virallisen annosrekisterin avulla. Tarvittaessa viranomaisvaatii luvanhaltijoita laatimaan erikoisraportteja tai esittämään korjaavia toimenpiteitä toiminnassa havaittuihin kehityskohteisiin.

Viranomaisvalvonta nojaa säteilyannosten osalta Valtioneuvoston asetuksen 717/2013 luvussa 3 esitettyyn vaatimukseen, minkä mukaan säteilyaltistuksen on oltava niin pieni kuin käytännöllisillä toimilla on mahdollista [58]. Tämän lisäksi Säteilyturvakeskuksen asettamat YVL-ohjeet edellyttävät, että kollektiivisen annoksen on oltava käyvillä laitoksilla alle 2,5 manSv/ GWe kahden peräkkäisen vuoden keskiarvona [4]. Tämä vaatimus johti vuonna 2005 Loviisan laatimaan erikoisraporttiin ja tehostettuihin ALARA-toimenpiteisiin. Näiden toimenpiteiden ansiosta Loviisan voimalaitoksen kollektiivinen säteilyannos pieneni noin 0,5 manSv vuodessa. Tämä on merkittävä annossäästö ja siihen johtaneita toimenpiteitä voidaan pitää erittäin onnistuneina.

6.4 Riskitietoiset tarkastusohjelmat

Riskitietoinen tarkastusohjelma on uusi lähestymistapa käytönaikaisiin tarkastuksiin. Perinteinen tarkastusohjelma perustuu komponenttien turvallisuusluokituksiin: korkeamman turvallisuusluokituksen komponentit tarkastetaan useammin ja perusteellisemmin. Tämä lähestymistapa ei ota huomioon yksittäisten komponenttien vikaantumisalttiutta tai vikaantumisesta aiheutuvia seurauksia muuten kuin turvallisuusluokituksen kautta. Tarkastusohjelmassa ei myöskään huomioida tarkastustyöstä aiheutuvaa haittaa, esimerkiksi työntekijöille aiheutuvaa säteilyannosta.

Riskitietoisen tarkastusohjelman laatiminen alkaa jokaisen komponentin vaurioitumistodennäköisyyden ja vaurioitumisen seuraamusten arvioimisella. Vaurioitumistodennäköisyyden suuruutta arvioitaessa otetaan huomioon komponentin rakenteet sekä olosuhteet, joissa komponenttia käytetään, kuten odotettavissa olevat lämpötransientit ja virtausolosuhteet. Vaurioitumistodennäköisyyden ja vaurion seuraamusten perusteella komponentit jaetaan riskiluokkiin. Tarkastusohjelman kohteet valitaan riskiluokkien, luoksepäästävyiden, säteilytasojen, kustannusten ja käyttökokemuksen perusteella [59].

Olkiluodon laitoksella otettiin käyttöön riskitietoinen tarkastusohjelma (RI-ISI, Risk Informed In-Service Inspection) yksikön OL2 seisokissa R212. Vuonna 2013 uusi tarkastusohjelma oli käytössä molempien laitosten revisioissa ja siihen kuuluivat järjestelmät 321 (sammutetun reaktorin jäähdytysjärjestelmä), 326 (reaktorikannen ruiskutusjärjestelmä) ja 331 (reaktoriveden puhdistusjärjestelmä) sekä OL2-laitoksella 323 (reaktorisydämen ruiskutusjärjestelmä) [60]. Tarkastukset ovat pääosin putkistojen hitsausliitosten määräaikaistarkastuksia. Riskitietoinen tarkastusohjelma pienensi useimpien järjestelmien tarkastuksesta seuraavia työannoksia. Laitoksen 1 järjestelmän 326 tarkastusten aiheuttamat annokset kasvoivat 30 % tarkastuskohteiden lisääntymisen ja vaihtumisen takia. Kokonaisuutena tarkastuksista seuranneet annokset pienenevät merkittävästi, jopa 57,3 % eli 239,3 mSv. Annosten pienentyminen johtuu ensisijaisesti tarkastusten siirtymisestä pois vahvasti säteilevistä tiloista. Koko laitoksen tarkastusohjelmassa

ta aiheutuvat annokset pienenevät vuonna 2013 noin 27 % verrattuna vuosien 2009 – 2012 keskiarvoon [60].

Loviisan laitoksella riskitietoiseen tarkastusohjelmaan siirryttiin 2008. Vuosittaisten tarkastuskohteiden kokonaislukumäärä kasvoi 580:stä 1024:ään. Erityisesti pääkiertopumppujen tarkastukset lisääntyivät neljästä 183:een [61]. Sydämen vaurioitumistajuuden muutos on raportin mukaan $\Delta CDF = -3,69 \cdot 10^{-6}$, mistä ylivoimaisesti suurin osa johtuu syöttövesijärjestelmän (RL) pienentyneestä riskistä. Muiden komponenttien vaikutus kokonaisriskin muutokseen on kahdesta neljään kertaluokkaa pienempi.

Tarkastuskohteiden kokonaislukumäärä kasvaa riskitietoisesta tarkastusohjelman käyttöönoton myötä, mutta osa järjestelmäkohtaisista tarkastuslaajuuksista laskee. Esimerkiksi primääriputkien (YA-järjestelmä) päähitsien tarkastuslaajuus pienenee noin kolmasosan aiemmasta [62]. Vuosina 1998 – 2007 näistä tarkastuksista on kertynyt yhteensä noin 400 manmSv säteilyannos, joten annossäästöä kertynee yli 200 manmSv seuraavien kymmenen vuoden aikana. Myös primäärivereden puhdistusjärjestelmän (TC-järjestelmä) tarkastuskohteiden lukumäärä pienenee merkittävästi, Loviisa 1:llä viidesosaan ja Loviisa 2:lla kolmasosaan. Matalapaineisen hätäjähdytysjärjestelmän (TH) ja korkeapaineisen hätälisävesijärjestelmän (TI) tarkastuskohteista valtaosa siirtyy suojarakennuksen ulkopuolelle. Tämä vähentää annoskertymää edelleen.

Joidenkin järjestelmien tarkastuslaajuus kasvaa, mistä aiheutuu aikaisempaa suurempi annoskertymä. Sprinklerijärjestelmän (TQ) ja pääkiertopumppujen (YD) tiivisteviesijärjestelmän tarkastukset lisääntyvät huomattavasti. Erityisesti höyrystimien ulospuhallusjärjestelmän (RY) tarkastuksista voi kertyä runsaasti säteilyannosta. Ulospuhallusjärjestelmän tarkastuksiin liittyvistä eristetoista aiheutuneen vartenotettava säteilyannos. Vaikutusten numeerinen arviointi on kuitenkin hankalaa, sillä tarkastusohjelman muutokseen liittyy samalla säteilyannosta lisääviä ja vähentäviä muutoksia. Varmuus vaikutuksesta säteilyannokseen saadaan vasta ensimmäisen kymmenvuotisjakson (2008 – 2017) loputtua [63].

Suomalaisten ydinvoimalatyöntekijöiden työssään saamat säteilyannokset alittavat selvästi tämänhetkisten viranomaisvaatimusten tason. Säteilyannokset ovat laskeneet 1990-luvun alkuaikoina saavutetun maksimin jälkeen noin puoleen. Kansainvälisessä vertailussa Olkiluodon laitokset pärjäävät hyvin samankaltaisiin ruotsalaisiin laitoksiin verrattuna. Loviisan voimalaitosyksiköt ovat rakenteeltaan ainutlaatuisia VVER-440 –laitosten joukossa, minkä takia työntekijöiden säteilyaltistus on verraten suurta. Samalla Loviisan yksiköiden ydinturvallisuus on merkittävästi samankaltaisia laitoksia parempi.

Ydinvoima herättää voimakkaita tunteita ja sitä koskeva yhteiskunnallinen keskustelu on vilkasta. Kannanotoissa ydinvoiman puolesta tai sitä vastaan ei kuitenkaan puhuta työntekijöiden säteilyaltistuksesta juuri lainkaan. Väestölle onnettomuuksista ja käytetystä ydinpolttoaineesta mahdollisesti aiheutuva säteilyaltistus on herättänyt paljon enemmän keskustelua. Teollisuus, jonka työntekijöille laitosten normaalikäytöstä aiheutuva säteilyaltistus keskittyy, on ollut perinteisesti ydinvoimamyönteinen. Yritysten ja myös ammattiyhdistysliikkeen ydinvoimamyönteisyys kertoo osaltaan siitä, että työperäistä säteilyaltistusta ydinvoimaloissa ei koeta merkittävänä terveysuhkana. Tämä tukee väittämää, jonka mukaan ydinvoimatyöntekijöiden suojelemisessa säteilyltä on onnistuttu hyvin.

Säteilysuojelutyö nojaa kolmeen periaatteeseen. Oikeutusperiaate toteutuu suomalaisilla ydinvoimaloilla kiitettävästi, jos sähköntuotannosta aiheutuvan terveyshaitan hyväksyttävänä tasona pidetään viranomaisvaatimusten arvoa 2,5 manSv/GWe laskettuna erikseen jokaiselle yksikölle. Työntekijöiden säteilyaltistus on pysynyt tämän rajan alapuolella yksittäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta. Jos säteilyannoskehitys säilyy viime vuosien kaltaisena, Olkiluodon voimalaitos saavuttaa uusille ydinvoimalaitoksille asetetun rajan 0,5 manSv/GWe. On myös muistettava, että säteilyaltistus ei ole erillinen ilmiö, vaan seuraus tehdyistä tarkastus-, huolto- ja korjaustöistä. Säteilyturvallisuuden lisäämiseen tähtäävät toimenpiteet täytyy aina tasapainottaa muiden turvallisuuden osalueiden kuten ydinturvallisuuden kanssa. Esimerkiksi vuosien 1992 ja 1994 Olkiluodossa tehdyt putkilinjojen muutostyöt aiheuttivat työntekijöille huomattavan säteilyannoksen mutta edistivät ydinturvallisuutta.

Yksilönsuojaperiaatteen toteutumisesta kertoo se, että vuotuisia säteilyannosrajoja ei ole koskaan ylitetty suomalaisilla ydinvoimaloilla. Viranomaisvaatimusten vuosiannosrajat alitetaan selvästi myös eniten altistuvien yksilöiden kohdalla. Lähivuosina voimaan tulevat tiukemmat annosrajat alitetaan jo tälläkin hetkellä. Ydinvoimayhtiöillä on lisäksi omat, viranomaisvaatimuksia tiukemmat annosrajoitukset, joiden saavuttamiseksi tehdään määrätietoista työtä. Optimointiperiaate toteutuu myös kiitettävästi. Ydinvoimayhtiöiden henkilöstö tekee jatkuvasti säteilyannoksen pienentämiseen tähtäävää työtä ja havaittuihin epäkohtiin puututaan. Kollektiiviset säteilyannokset ovatkin pienentyneet molemmilla voimalaitoksilla. Lähdetermin minimoimiseen tähtäävät muutostyöt kuten uudet tehokkaammat höyrynkuvaimet sekä antimonittomat tiivisteet vähentävät säteilyaltistusta edelleen.

Kontaminaation torjunnassa on onnistuttu hyvin. Vakavia kontaminaatiotapauksia tapahtuu vain harvoin ja näistä aiheutuvat sisäiset säteilyannokset ovat pieniä. Säteilyturvakeskuksen voimalaitoshenkilökunnalle, urakoitsijoille ja voimalaitosten ympäristön asukkaille tekemissä kokokehomittauksissa havaitaan laitosperäisiä nuklideja vain harvoin. Havaittujen nuklidien aiheuttamat säteilyannokset ovat pieniä, selvästi suomalaisen vuotuista taustasäteilyannosta pienempiä.

Ammattiryhmistä suurimpia kollektiiviannoksia saavat mekaanisia ja konekunnossapitotöitä tekevät henkilöt. Näiden lisäksi materiaalitarkastajat, siivoajat sekä eristetyöntekijät saavat merkittäviä kollektiiviannoksia. Henkilöannosten osalta eniten altistuvat eristetöiden tekijät sekä mekaanisia ja konekunnossapitotöitä tekevät. Säteilyannosten vähentäminen jatkossa voi olla haastavaa, sillä huoltotöiden määrä lisääntyy ydinvoimalaitosten ikääntyessä. Lähdetestin minimoimisen tärkeys korostuu laitosten ikääntyessä. Tärkeimmän antimonin lähteen eli pääkiertopumppujen tiivisteiden poistaminen Loviisan voimalaitosyksiköistä voi johtaa useiden kymmenien prosenttien annossäästöön.

Muutostöiden vaikutus voimalaitosten säteilytasoihin näkyy aikaisintaan seuraavassa revisiossa. Monissa tapauksissa selvä muutos nähdään vasta useiden vuosien jälkeen. Sama koskee säteilytasojen alentamiseksi tehtyjen töiden vaikutuksia. Ydinvoiman käytössä vallitsee muutenkin varovainen suhtautuminen muutoksiin, sillä mahdollisten virheiden korjaaminen on hyvin kallista. Ydinvoimaloiden kunnossapidossa ja muutostöissä suositetaan rauhallista ja tasaista vauhtia sekä pieniä askelia. Myös säteilyannosten kehitys on enimmäkseen tasaista muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Tämä voidaan tulkita osoitukseksi siitä, että organisaatiot ovat oppineet tärkeimmät säteilyannoksen minimoivat toimintatavat laitosten käyttöänsä aikana ja nykyään kehitys kohdistuu pieniin yksityiskohtiin. Suuren työntekijämäärän takia näistäkin kertyy huomattavia vähennyksiä kollektiiviannokseen. Toimintatavoissa näkyy ydinvoima-alan pitkäjänteisyys, toiminnassa pyritään ennakoitavuuteen ja riskien minimointiin sekä jatkuvaan parantamiseen.

8 Lähdeluettelo

- [1] 27.3.1991/592 Säteilylaki, julkaisussa: Finlex [verkkotietokanta], Oikeusministeriö ja Edita, 1991. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1991/19910592>.
- [2] 20.12.1991/1512 Säteilyasetus, julkaisussa Finlex [verkkotietokanta], Oikeusministeriö ja Edita, 1991. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1991/19911512>.
- [3] Säteilyturvakeskus; Ydinvoimalaitosohjeet (YVL-ohjeet), YVL-C.2, Saatavilla: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVLC-2>.
- [4] Säteilyturvakeskus; Ydinvoimalaitosohjeet (YVL-ohjeet), YVL-7.9, Saatavilla: <http://plus.edilex.fi/stuklex/fi/lainsaadanto/saannosto/YVL7-9?toc=1>.
- [5] Euroopan komissio; Neuvoston direktiivi 2013/59/Euratom, 2013.
- [6] G. F. Knoll; Radiation Detection and Measurement, Third Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] Teollisuuden Voima Oyj, Henttinen, Jukka; TL-dosimetrijärjestelmän käyttö ja laadunvarmistus, ei julkaistu, 2011.
- [8] Fortum Power and Heat Oy, Hirvelä, Miska; LO1 ja LO2 annosmittauspalvelun määräaikaisten hyväksyntä, hakemus Säteilyturvakeskukselle, ei julkaisu, 2011.
- [9] RADOS Technology Oy; TLD Thermoluminescent Dosimetry System, tekninen esite, Turku.
- [10] A. Tynkkynen; Pro Gradu -tutkielma: Lo1 primääripiirin pääkiertopumppukuopan neutronisäteily, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2007.
- [11] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 12.4.
- [12] Teollisuuden Voima Oyj; Säteilysuojelun jatkokoulutus (SÄT-kurssi), 2012.
- [13] I. Outola; Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ympäristössä, Säteilyturvakeskuksen sisäinen luentomateriaali, ei julkaistu, 2010.
- [14] Säteilyturvakeskus; Ihmisen radioaktiivisuus, Säteily- ja ydinturvallisuuskatsauksia. Saatavilla: http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/muut_julkaisut/fi_FI/muut_julkaisut/, 2009.
- [15] Säteilyturvakeskus; Annosrekisteri.
- [16] Teollisuuden Voima Oyj; Olkiluoto 1 & 2 Final Safety Analysis Report, section 7.7.5.
- [17] S. Chu, E. L.P. ja F. R.B.; The Lund/LBNL Nuclear Data Search, [Online]. Saatavilla: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>. [Haettu 5. 3. 2014].
- [18] K. H. Neeb; The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors, Berlin: de Gruyter, 1997.

- [19] Teollisuuden Voima Oyj; Olkiluoto 1 & 2 Final Safety Analysis Report, section 5.4.3.
- [20] Teollisuuden Voima Oyj, Henttinen, Jukka; Alara-ohjelma, Teollisuuden Voima Oyj, 2010.
- [21] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 5.5.
- [22] Säteilyturvakeskus; Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta, vuosiraportti 2013. Saatavilla: http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/tiivistelmat/b_sarja/fi_FI/stuk-b172/.
- [23] Fortum Power and Heat Oy; Kemian ohje: LO1 ja LO2 Primääripiirin vesikemia, K-12-00008, sisäinen ohje, ei julkaistu.
- [24] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 13.7.1.4.
- [25] N. Mononen; Käytön tarkastusohjelman vuoden 2013 C8-tarkastus / OL, Säteilyturvakeskus, ei julkaistu, 2013.
- [26] H. Koura, T. Tachibana ja J. Katakura; WWW Chart of the Nuclides 2010. Saatavilla: <http://www.ndc.jaea.go.jp/CN10/index.html>.
- [27] Honkala, R., Tommila, S., Holmsten, T.; Käyttäjän käsikirja, osa 5: Pääkiertopumppu, Imatran Voima Oy, Fortum Power and Heat Oy.
- [28] Fortum Power and Heat Oy; Loviisan voimalaitos - Vuosihuolto 2013, 2013.
- [29] Fortum Power and Heat Oy, Kontio, Timo; Loviisan voimalaitoksen Alara-toimenpideohjelma, ei julkaistu, 2013.
- [30] V. Riihiluoma; Esittelymuistio: OL1, OL2 – Altistuminen neutronisäteilylle polttoaineen siirrossa, ei julkaistu.
- [31] International Atomic Energy Agency; Review of fuel failures in water cooled reactors, Vienna: IAEA, ISBN: 978-92-0-102610-1, 2010.
- [32] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 9.3.9.
- [33] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 11.2.
- [34] Fortum Power and Heat Oy; Kontio, Timo; Roger, Kvarnström; Loviisan ydinvoimalaitoksen työntekijöiden säteilyannokset, Fortum Power and Heat Oy, Espoo, 2006.
- [35] Sovijärvi, Jukka; Loviisa 2:n Dekontaminointi, tekijä: *Ydintekniikan seminaari, Syksy 1994*, Lappeenranta, 1994.
- [36] Imatran Voima, Hukari, O.; Koko primääripiirin dekontaminointi, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu, 1994.
- [37] Imatran Voima Oy, Tamminen, A.; Loviisa 1 ja 2, vuosiraportti 1994, Imatran Voima Oy.

- [38] H. Wille, H.-O. Bertholdt ja F. Roumiguère; Chemical Decontamination With the CORD UV Process: Principle and Field Experience, Proceedings of 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, 1997.
- [39] Teollisuuden Voima Oyj; Olkiluoto 1 & 2 Final Safety Analysis Report, section 2.3.
- [40] Teollisuuden Voima Oyj; OL1/OL2 TIMO-hankkeen kuvaus, esityskalvot, ei julkaistu, 2002.
- [41] International Atomic Energy Agency; Power Reactor Information System. Saatavilla: <http://www.iaea.org/pris/home.aspx>
- [42] Information System on Occupational Exposure, IAEA; ISOE Information Sheet - European Dosimetric Results for 2011, ISOE European Technical Centre. Saatavilla: http://www.isoe-network.net/index.php/component/docman/cat_view/120-etc-information-sheets.html, 2012.
- [43] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 & 2 Final Safety Analysis Report, luku 1.3.
- [44] Teollisuuden Voima Oyj; Vuosiraportti 1989, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [45] Säteilyturvakeskus, Tossavainen, Kirsi (toim.); Suomen ydinvoimalaitosten käyttö: Neljännesvuosiraportti - 4. neljännes 1989 ja vuosiyhteenveto, Säteilyturvakeskus, STUK-B-YTO 68.
- [46] Teollisuuden Voima Oyj; Vuosiraportti 1992, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [47] Teollisuuden Voima Oyj; TVO I/II - RX94 säteilysuojelu sekä siivous ja puhtaanapito, ei julkaistu, 1994.
- [48] M. Nopanen; Re: Pari kysymystä Loviisan vuosihuolloista, [yksityinen sähköpostikeskustelu].
- [49] Fortum Power and Heat Oy; Vuosiraportti 2004, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [50] Teollisuuden Voima Oyj; Vuosiraportti 1999, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [51] Teollisuuden Voima Oyj; Vuosiraportti 2001, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [52] Fortum Power and Heat Oy; Loviisa 1 ja 2, kuukausiraportti 1/2009, kirje Säteilyturvakeskukselle, ei julkaistu.
- [53] M. Ritala; YD-pumpputyön annokset, [yksityinen sähköpostiviesti Antti Tynkkyselle], 2009.
- [54] Teollisuuden Voima Oyj, Nurmela, Jaakko; OL1 JA OL2: säteilysuojelutoimenpiteet 313 - järjestelmän pääkiertopumpun roottorin tasapainotuksessa, TVO:n sisäinen ohje, ei julkaistu.
- [55] Nord Pool Spot AS; Nord Pool Spot, [Online]. Saatavilla: <http://www.nordpoolspot.com/> [Haettu 22. 5. 2014]

- [56] Nuclear Energy Agency, OECD; Work Management to Optimise Occupational Radiological Protection at Nuclear Power Plants, ISBN 978-92-64-99089-0, 2009.
- [57] Teollisuuden Voima Oyj; Toimintaopas - Työskentely ydinvoimaympäristössä, Helsinki.
- [58] 717/2013 Valtioneuvoston asetus ydinvoimalaitoksen turvallisuudesta, julkaisussa Finlex [verkkotietokanta], Työ- ja elinkeinoministeriö ja Edita, 2013. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130717>
- [59] A. Julin; Putkiston riskitietoisien tarkastusohjelman käyttöönotto OL1 ja OL2 laitoksilla, tarkastusmuistio 1/C4522/2012, ei julkaistu.
- [60] Teollisuuden Voima Oyj, Tammela, Jari, Jenni, Ari; ASME, RI-ISI ohjelman vaikutuksia säteilyannokseen, TVO:n selvitys, ei julkaistu, 2013.
- [61] Co-Operation Forum for VVER Regulators, Working Group on the Use of PSA; Practises and Use of Risk Informed Applications in Regulation and Safety Management, Final Report, 2013.
- [62] Fortum Power and Heat Oy, Nikula, V., Paavola, I., Jänkälä, K.; LO2 putkistojen riskiperustainen määräaikaistarkastusohjelma 10-vuotisjaksolle 2011-2020, ei julkaistu.
- [63] Fortum Power and Heat Oy, Nikula, Veijo; Loviisa 1 putkistojen riskitietoinen määräaikaistarkastusohjelma 10-vuotisjaksolle 2008-2017, ei julkaistu.
- [64] T. Kontio; RE: Loviisan henkilöannokset viikkoraportissa 2/2014, [yksityinen sähköpostikeskustelu].